

ОБОРУДОВАНИЕ И ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ МЕТАЛЛОВ ПЛАВЛЕНИЕМ И ДАВЛЕНИЕМ

Под редакцией

Г. Г. Чернышова и Д. М. Шашина

Издание третье, стереотипное

ДОПУЩЕНО

*УМО вузов по университетскому политехническому образованию
в качестве учебного пособия для студентов вузов,
обучающихся по направлению подготовки «Машиностроение»*



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
МОСКВА
КРАСНОДАР
2021

УДК 621.791
ББК 30.61я73

013 Оборудование и основы технологии сварки металлов плавлением и давлением : учебное пособие для вузов / Г. Г. Чернышов, Д. М. Шашин, В. И. Гирш [и др.] ; под редакцией Г. Г. Чернышова и Д. М. Шашина. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 464 с. : ил. — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-8114-6853-9

Рассмотрены принципы классификации сварных соединений, основные виды сварки плавлением и давлением (дуговая, электрошлаковая, контактная сварка) и специальные виды сварки.

Приведены рекомендации для выбора технологии сварки различных конструкционных материалов, а также основные сведения о сварочных материалах и оборудовании, обеспечивающих осуществление процесса и заданной технологии сварки.

Учебное пособие предназначено для студентов вузов первого уровня высшего профессионального образования (бакалавр техники и технологий), обучающихся по направлению подготовки «Машиностроение» и по профилю «Оборудование и технология сварочного производства». Полезно для студентов других профилей, связанных с производством сварных металлоконструкций, а также для конструкторов и технологов, работающих в области сварочного производства.

УДК 621.791
ББК 30.61я73

Коллектив авторов:

*Георгий Георгиевич ЧЕРНЫШОВ, Дмитрий Михайлович ШАШИН,
Валентин Иосифович ГИРШ, Анатолий Петрович ИСАЕВ,
Николай Владимирович КОБЕРНИК, Борис Валентинович КОПАЕВ,
Александр Владимирович МИЛОВАНОВ,
Александр Михайлович РЫБАЧУК.*

Рецензент

Н. П. АЛЁШИН — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технологии сварки и диагностики МГТУ им. Н. Э. Баумана, академик РАН.

Обложка

Е. А. ВЛАСОВА

© Издательство «Лань», 2021
© Коллектив авторов, 2021
© Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2021

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 150700 «Машиностроение».

При составлении рабочего учебного плана вузы могут усиливать технологическую подготовку студентов, включая (в рамках часов, отведенных на дисциплины специализаций) такие дополнительные учебные курсы, как «Технология сварки специальных сталей и сплавов», «Специальные виды сварки» и др.

Авторы настоящего издания предлагают учебное пособие, состоящее из трех разделов: оборудование и технология сварки плавлением, оборудование и технология контактной сварки, специальные виды сварки плавлением и давлением.

Вопросы, связанные с теоретическими основами сварки, источниками питания для дуговой сварки, газопламенной обработкой, проектированием сварных соединений и автоматизацией сварочных процессов, рассматривают в других дисциплинах, и они не включены в данный учебник.

Содержание учебного пособия соответствует основным образовательным программам, сформированным на основе федерального государственного образовательного стандарта (ФГОС ВПО), по данному направлению подготовки.

Учебное пособие полезно для студентов других профилей, связанных с производством металлоконструкций, а также для повышения квалификации конструкторов и технологов, работающих в области сварочного производства.

Профессор Г. Г. Чернышов написал гл. 1, 3, 5–7; доцент А. М. Рыбачук — гл. 2; доцент Б. В. Копаев — гл. 8, 10, 12; доцент А. П. Исаев — гл. 9, 11; доцент Д. М. Шашин, доцент А. В. Милованов — гл. 13; доцент В. И. Гирш — гл. 14, 15; доцент Н. В. Коберник — гл. 4.

ВВЕДЕНИЕ

Современный технический прогресс промышленности неразрывно связан с совершенствованием сварочного производства.

Сварка — такой же необходимый технологический процесс, как обработка металлов резанием, литье,ковка,штамповка. Высокая производительность и большие технологические возможности сварки обеспечили ее широкое применение для создания неразъемных соединений при производстве металлургического, химического и энергетического оборудования, различных трубопроводов, изготовлении и ремонте судов, автомобилей, самолетов, турбин, котлов, реакторов, строительных и других конструкций.

Перспективы сварки как в научном, так и в техническом плане безграничны. Ее применение способствует совершенствованию машиностроения и развитию ракетостроения, атомной энергетики, радиоэлектроники.

О возможности использования «электрических искр» для плавления металлов еще в 1753 г. говорил академик Петербургской академии наук Г. Р. Рихман, занимавшийся исследованиями атмосферного электричества. В 1802 г. профессор Медико-хирургической академии (Санкт-Петербург) В. В. Петров открыл явление электрической дуги и указал возможные области ее практического применения. Однако потребовались многие годы совместных усилий ученых и инженеров, направленных на разработку источников энергии, необходимых для реализации процесса электрической сварки металлов. Важную роль в создании таких источников сыграли открытия и изобретения в области магнетизма и электричества.

В 1882 г. российский ученый-инженер Н. Н. Бенардос, работая над созданием аккумуляторных батарей, открыл способ электродуговой сварки металлов неплавящимся угольным электродом. Им были разработаны дуговая сварка в защитном газе и дуговая резка металлов.

В 1888 г. российский инженер Н. Г. Славянов предложил проводить сварку плавящимся металлическим электродом. С его именем связано развитие металлургических основ электрической дуговой сварки, разработка флюсов для воздействия на состав металла шва, создание первого автоматического генератора.

В середине 1920-х гг. исследования процесса сварки проводили во Владивостоке (В. П. Вологдин, Н. Н. Рыкалин, Г. К. Татур, С. А. Данилов), Москве (Г. А. Николаев, К. К. Хренов, К. В. Любавский), Ленинграде (В. П. Никитин, А. А. Алексеев, Н. О. Окерблом) и Киеве (Е. О. Патон).

В 1924–1935 гг. применяли в основном ручную сварку электродами с тонкими ионизирующими (меловыми) покрытиями. В эти годы под руководством В. П. Вологодина были изготовлены первые отечественные котлы и корпуса нескольких судов. С 1935–1939 гг. начали использовать электроды с толстым покрытием и стержнем из легированной стали, что обеспечило широкое распространение сварки в промышленности и строительстве. В 1940-е гг. была разработана сварка под флюсом, которая позволила повысить производительность процесса и качество сварных соединений, механизировать производство сварных конструкций. В начале 1950-х гг. в ИЭС создают электрошлаковую сварку для изготовления из литых и кованных заготовок крупногабаритных деталей оборудования тяжелого машиностроения.

С 1948 г. в промышленности применяют ручную дуговую сварку неплавящимся электродом и механизированную и автоматическую сварку неплавящимся и плавящимся электродом в аргоне. В 1950-х гг. в ЦНИИТМАШе К. В. Любавским и Н. М. Новожиловым при участии специалистов из МВТУ им. Н. Э. Баумана и ИЭС им. Е. О. Патона был разработан высокопроизводительный процесс сварки плавящимся электродом низкоуглеродистых и низколегированных сталей в среде углекислого газа, обеспечивающий высокое качество сварных соединений.

Создание новых источников тепловой энергии — концентрированного электронного и лазерного луча — обусловило появление принципиально новых способов сварки плавлением, названных электронно-лучевой и лазерной сваркой, успешно применяемых в промышленности. С развитием обитаемых орбитальных станций сварка потребовалась и в космосе. Наши космонавты В. Н. Кубасов и Г. С. Шонин в 1969 г., а С. Е. Савицкая и В. А. Джанибеков в 1984 г. провели в космосе сварку, резку и пайку различных металлов.

Контактная сварка, при осуществлении которой используется теплота, выделяющаяся в области контакта свариваемых частей при прохождении электрического тока, относится к способам сварки с применением давления. Различают точечную, стыковую, шовную и рельефную контактную сварку. Основные способы контактной сварки разработаны в XIX в. В 1856 г. английский физик Уильям Томсон (Кельвин) открыл стыковую контактную сварку сопротивлением. В 1887 г. Н. Н. Бенардос получил патент на способы точечной и шовной контактной сварки угольными электродами. Позднее, когда появились электроды из меди и ее сплавов, эти способы контактной сварки стали основными.

В 30–50-е гг. XX в. в СССР сложились научные школы и коллективы по изучению и практическому применению контактной сварки.

В Москве (ЦНИИТМАШ, НИАТ, МАТИ, МВТУ) большой комплекс работ по теории и технологии контактной сварки выполнили А. С. Гельман и Н. С. Кабанов, Д. С. Балковец, Б. Д. Орлов, П. Л. Чулошников, А. А. Чакалев, И. Я. Рабинович, Н. Л. Каганов, а также А. И. Гуляев (ГАЗ).

В Ленинграде (ВНИИЭСО, завод «Электрик») исследования и практическое применение контактной сварки и проектирование оборудования осуществляли А. Я. Кочановский, А. И. Ахун, С. К. Слиозберг, К. А. Кочергин, Ф. А. Аксельрод, В. Я. Хазов, В. А. Гилевич, В. Б. Кисельников, В. Я. Пушкин, Л. В. Глебов, Ю. И. Филиппов, А. Я. Яшунский, З. А. Рыськова и др.

В Киеве (ИЭС) разработкой технологии и оборудования для контактной сварки занимались К. К. Хренов, В. К. Лебедев, С. И. Кучук-Яценко, В. Э. Моравский, В. Н. Подола, И. В. Пентегов и др.

Контактная сварка занимает ведущее место среди механизированных способов сварки в автомобилестроении при соединении тонколистовых штампованных конструкций кузова. Стыковой сваркой соединяют стыки железнодорожных рельсов и магистральных трубопроводов. Шовную сварку применяют при изготовлении тонкостенных емкостей. Рельефная сварка — наиболее высокопроизводительный способ сварки плоскостных тонколистовых панелей и арматуры для строительных железобетонных конструкций. Конденсаторную контактную сварку широко используют в электронной промышленности при изготовлении элементной базы и микросхем.

С развитием техники возникает необходимость сваривать детали толщиной от нескольких микрометров (в микроэлектронике) до десятков сантиметров и даже метров (в тяжелом машиностроении). Все чаще в сварных конструкциях наряду с углеродистыми и низколегированными сталями применяют специальные стали, легкие сплавы и сплавы на основе титана, молибдена, хрома, циркония и других металлов, а также разнородные и композиционные материалы, что требует постоянного обновления применяемых видов сварки и сварочного оборудования.

В этих условиях важную роль играет подготовка — теоретическая и практическая — квалифицированных кадров для сварочного производства, что является основной задачей данного учебного пособия.

Часть I

**ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ
И ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ
СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ**

1.1. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ. КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ СВАРКИ, СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ШВОВ

1.1.1. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ

Конструкции сложной формы, как правило, получают в результате объединения друг с другом отдельных элементов (детали, сборочные узлы) с помощью разъемных или неразъемных соединений.

ГОСТ 2601-84 «Сварка металлов. Термины и определения основных понятий» устанавливает ряд терминов и определений основных понятий при сварке металлов для сварных соединений и швов.

Сварной конструкцией называют металлическую конструкцию, изготовленную сваркой отдельных деталей. Часть такой конструкции, в которой сварены примыкающие друг к другу элементы, называют *сварным узлом*.

Сварка — процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между соединяемыми частями при их местном или общем нагревании, или пластическом деформировании, или совместном действии того и другого.

Сварные соединения — неразъемные соединения, выполненные сваркой. В сварное соединение входят сварной шов, прилегающая к нему зона основного металла, в которой в результате теплового воздействия сварки произошли структурные и другие изменения (зона термического влияния), и примыкающие к ней участки основного металла.

Сварной шов представляет собой участок сварного соединения, образовавшийся в результате кристаллизации расплавленного металла сварочной ванны.

Основной металл — металл подвергающихся сварке соединяемых частей.

Зона термического влияния при сварке — участок основного металла, не подвергшийся расплавлению, структура и свойства которого изменились в результате нагрева при сварке или наплавке.

Сварочная ванна — это часть металла свариваемого шва, находящаяся при сварке плавлением в жидком состоянии.

Углубление, образующееся в конце валика под действием давления дуги и объемной усадки металла шва, называют *кратером*.

Металл для введения в сварочную ванну в дополнение к расплавленному основному металлу называют *присадочным металлом*.

Переплавленный присадочный металл, введенный в сварочную ванну или наплавленный на основной металл, называют *наплавленным металлом*.

Сплав, образованный переплавленным основным или переплавленным основным и наплавленным металлами, называют *металлом шва*.

1.1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ СВАРКИ

Для получения сварного соединения и образования межатомных связей атомы соединяемых деталей получают некоторую дополнительную энергию, необходимую для преодоления существующего между ними энергетического барьера, называемую *энергией активации*. При сварке ее вводят в зону соединения извне путем нагрева (термическая активация) или пластического деформирования (механическая активация).

В зависимости от *характера активации* при выполнении соединений различают два основных вида сварки — *плавлением* и *давлением*.

При *сварке плавлением* детали по соединяемым кромкам оплавляются под действием внешнего источника теплоты. Расплавленный металл, сливаясь в общий объем, образует жидкую сварочную ванну. При ее охлаждении жидкий металл затвердевает и образует сварной шов. Шов может быть образован за счет расплавления металла только свариваемых кромок или металла кромок и присадки, дополнительно вводимой в сварочную ванну.

При *сварке давлением* осуществляют совместное пластическое деформирование материала по кромкам свариваемых деталей. Благодаря пластической деформации облегчается установление межатомных связей соединяемых частей. Для ускорения процесса применяют сварку давлением с нагревом. При некоторых способах сварки давлением нагрев осуществляют до оплавления металла свариваемых поверхностей или промежуточных вспомогательных прокладок, а воздействие давления возможно в непрерывном или прерывистом режимах.

В настоящее время существует более 150 сварочных процессов, которые в соответствии с ГОСТ 19521-74 «Сварка металлов. Классификация» классифицируют по *физическим, техническим и технологическим признакам*.

Физическими признаками являются форма энергии и вид источника энергии, непосредственно применяемого для получения сварного соединения.

Все сварочные процессы по *форме энергии* относят к одному из трех классов: термическому, термомеханическому и механическому.

Термический класс включает в себя виды сварки плавлением (дуговая, плазменная, электрошлаковая, электронно-лучевая, лазерная, газовая, термитная и др.), осуществляемой с использованием различных источников тепловой энергии.

Термомеханический класс — виды сварки (контактная, диффузионная, газо- и дугопрессовая, индукционнопрессовая, печная и др.), осуществляемой с применением источников тепловой энергии и давления.

Механический класс — виды сварки давлением (холодная, ультразвуковая, магнитоимпульсная, сварка трением и взрывом), осуществляемой с использованием источников механической энергии и давления.

Техническими признаками классификации сварочных процессов являются способы защиты металла в зоне сварки, непрерывность процесса и степень его механизации (рис. 1.1).

Технологические признаки классификации устанавливаются для каждого вида сварки отдельно. Например, дуговая сварка может отличаться по виду электрода и дуги, роду и полярности тока, количеству электродов и наличию внешнего воздействию на формирование шва.

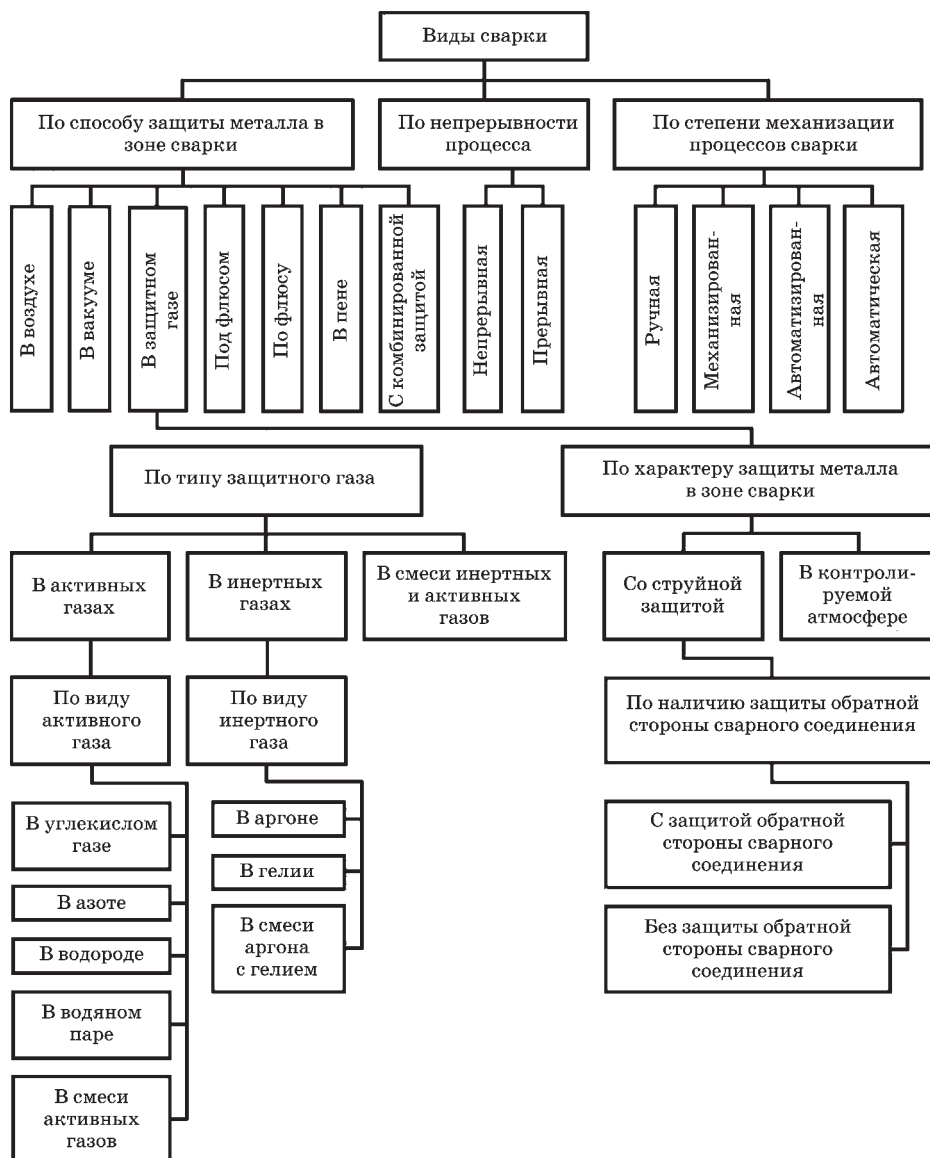


Рис. 1.1
Классификация видов дуговой сварки по техническим признакам

1.2. ВИДЫ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

1.2.1. ДУГОВАЯ СВАРКА

Этот вид сварки плавлением включает в себя те ее способы, при осуществлении которых источником нагрева является сварочная дуга, представляющая собой устойчивый электрический разряд, происходящий в газовой среде между двумя электродами или электродом и деталью.

При горении дуги и плавлении свариваемого и электродного металлов необходима защита сварочной ванны от воздействия атмосферных газов — кислорода, азота и водорода, так как они растворяются в жидком металле и ухудшают качество металла шва.

В соответствии с *техническими признаками* классификации сварочных процессов по *способу защиты* свариваемого металла и сварочной ванны от окружающей среды наиболее распространены дуговая сварка в защитном газе, под флюсом и с комбинированной защитой.

По *технологическим признакам* классификации в основном различают дуговую сварку плавящимся и неплавящимся электродами. Плавящимися электродами являются штучные электроды, металлические проволоки и стержни из сталей, сплавов алюминия, титана, никеля, меди и других металлов; неплавящимися — угольные, графитовые и вольфрамовые стержни и другие тугоплавкие металлы.

По *степени механизации процесса* наиболее распространены ручная, механизированная и автоматическая дуговая сварка.

Ниже приведены краткие описания и характеристики основных способов дуговой сварки.

Ручная дуговая сварка. Дуговая сварка, при которой возбуждение дуги, подача электрода и его перемещение проводятся вручную. Сварку выполняют штучными покрытыми электродами. Покрытый электрод представляет собой металлический стержень с нанесенным на его поверхность покрытием (обмазкой). Сварной шов образуется за счет расплавления металла свариваемых кромок и плавления стержня сварочного электрода.

Дуговая сварка под флюсом. Дуговая сварка, при которой дуга горит под слоем сварочного флюса. Под воздействием теплоты в зоне горения дуги плавятся кромки основного металла, электродная проволока и часть флюса. Подача проволоки в зону горения дуги механизирована, а перемещение дуги по свариваемым деталям выполняется вручную или специальными механизмами.

Дуговая сварка в защитных газах. Дуговая сварка, при которой дуга и расплавленный металл, а в некоторых случаях и остывающий шов, находятся в защитном газе, подаваемом в зону сварки с помощью специальных устройств. При этом можно использовать как неплавящийся, так и плавящийся электроды, а процесс выполнять ручным, механизированным или автоматическим способом.

Плазменная сварка. Сварка плавлением, при которой нагрев проводится сжатой дугой. В результате получают высокотемпературный ионизированный газ, называемый плазмой. Температура плазменной струи значительно выше, чем у обычной сварочной дуги. В качестве плазмообразующего газа чаще всего используют аргон, гелий или азот.

Электрошлаковая сварка. Этот процесс сварки осуществляют без дугового разряда. В отличие от дуговой сварки для расплавления основного и присадочного металлов используется теплота, выделяющаяся при прохождении сварочного тока через расплавленный электропроводящий шлак (флюс). Для формирования шва устанавливают медные ползуны (кристаллизаторы), охлаждаемые водой.

В соответствии с *технологическими признаками* классификации по *виду электрода* различают электрошлаковую сварку проволочным, пластинчатым электродом и плавящимся мундштуком; по *наличию колебаний электрода* — без колебаний и с колебаниями электрода; по *числу электродов* — одноэлектродную, двухэлектродную и многоэлектродную.

Электронно-лучевая сварка. Сварка плавлением, при которой для нагрева используется энергия сфокусированного потока электронов, движущихся с высокими скоростями в специальной камере в глубоком вакууме. В соответствии с *технологическими признаками* классификации различают сварку без колебаний и с колебаниями электронного луча.

Лазерная сварка. В соответствии с *технологическими признаками* классификации по *виду источников энергии* относится к *световой сварке* в числе других (солнечная и искусственными источниками света). Это сварка плавлением, при которой для нагрева используется энергия излучения *лазера* (название по первым буквам английской фразы, которая в переводе означает: усиление света посредством стимулированного излучения), ее можно выполнять на воздухе, в аргоне, гелии или углекислом газе.

Газовая сварка. Сварка плавлением, при которой для нагрева используют тепло пламени смеси газов, сжигаемой с помощью горелки. Плавление свариваемого и присадочного металлов осуществляется высокотемпературным газокислородным пламенем. В качестве горючего для сгорания в кислороде применяют ацетилен, водород, пропан-бутановую смесь, пары керосина, бензина, природный, светильный, нефтяной, коксовый и другие газы.

Термитная сварка. Свариваемые детали помещают в огнеупорную форму, а в установленный сверху тигель засыпают термит — порошкообразную смесь алюминия с железной окалиной. При горении термитной смеси развивается высокая температура (более 2000°C), образуется жидкий металл, который при заполнении формы оплавляет кромки свариваемых изделий, заполняет зазор, образуя сварной шов.

1.3. СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ И ШВЫ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ

1.3.1. СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

По *форме сопряжения* соединяемых деталей различают следующие типы сварных соединений: стыковое, угловое, тавровое, нахлесточное и торцовое. Применяют также соединения нахлесточные с точечными или пробочными и прорезными швами, выполненными дуговой сваркой.

Стыковое соединение (рис. 1.2а) представляет собой сварное соединение двух деталей, расположенных в одной плоскости и примыкающих друг

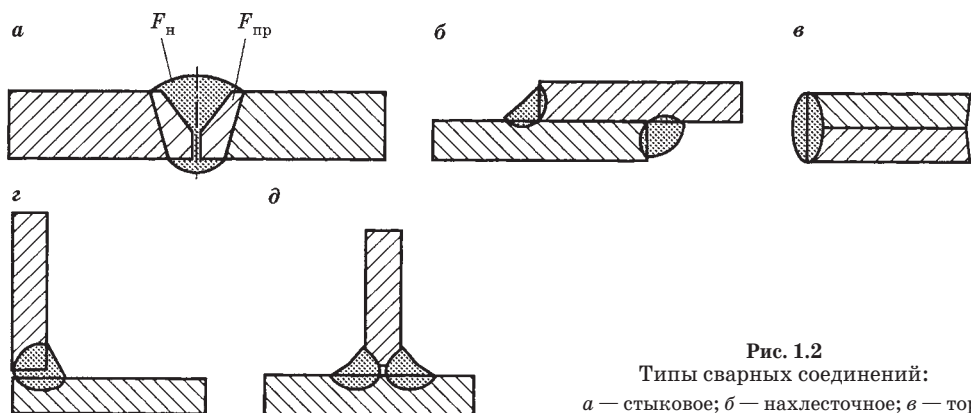


Рис. 1.2

Типы сварных соединений:

а — стыковое; б — нахлесточное; в — торцовое; г — угловое; д — тавровое.

к другу торцовыми поверхностями. Оно наиболее распространено в сварных конструкциях, поскольку имеет ряд преимуществ перед другими видами соединений.

Нахлесточное соединение представляет собой сварное соединение, в котором соединяемые элементы расположены параллельно и частично перекрывают друг друга (рис. 1.2б).

Торцовое соединение — это соединение, в котором боковые поверхности элементов примыкают друг к другу (рис. 1.2в).

Угловое соединение представляет собой сварное соединение двух элементов, расположенных под углом друг к другу и сваренных в месте примыкания их кромок (рис. 1.2г).

Тавровое соединение (рис. 1.2д) — это соединение, в котором к боковой поверхности одного элемента примыкает под углом и приварен торцом другой элемент. Как правило, угол между элементами прямой.

1.3.2. СВАРНЫЕ ШВЫ

В зависимости от *типов сварных соединений* различают стыковые, угловые, точечные и прорезные сварные швы.

Стыковые швы выполняют при сварке стыковых соединений, *угловые* — при сварке угловых, тавровых и нахлесточных соединений, *точечные* и *прорезные* — в тавровых и нахлесточных соединениях.

По *форме поперечного сечения* сварные швы бывают стандартные, выпуклые и вогнутые (рис. 1.3).

По *числу слоев* сварные швы могут быть однослойными и многослойными (рис. 1.4).

Слой — это часть металла сварного шва, которая состоит из одного или нескольких валиков, располагающихся на одном уровне поперечного сечения шва.

Валик — это металл шва, наплавленный или переплавленный за один проход.

Часть сварного шва, наиболее удаленную от его лицевой поверхности, называют *корнем шва*.

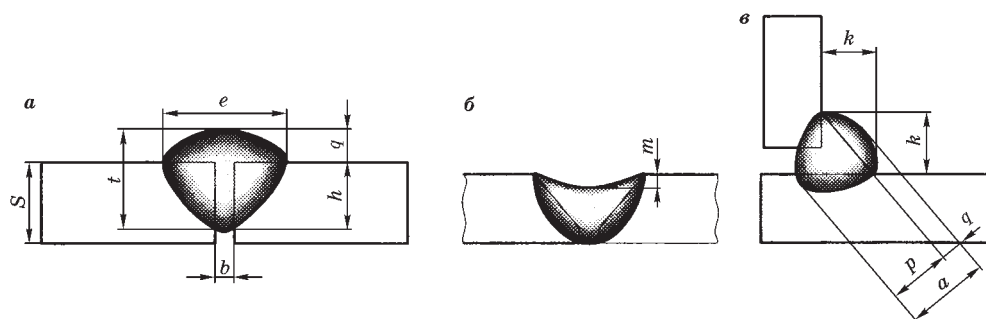


Рис. 1.3

Основные геометрические параметры стыкового (а) и углового (б, в) сварных швов:

S — толщина детали; e — ширина; q — выпуклость (усиление); m — вогнутость (ослабление); h — глубина проплавления; t — толщина стыкового шва; b — зазор в стыке; k — катет углового шва; p — расчетная высота углового шва; a — толщина углового шва.

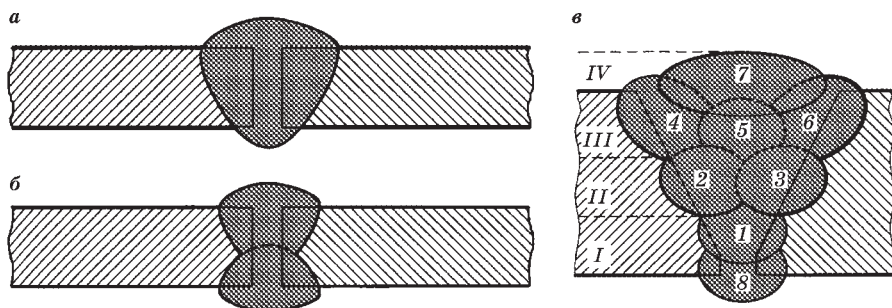


Рис. 1.4

Односторонний (а) и двусторонний (б) однопроходные швы и многослойный многопроходный (в) сварной шов:

в: 1–8 — последовательность выполнения проходов; I–IV — слои; 1 — корневой шов; 7 — облицовочный шов; 8 — подварочный шов.

В зависимости от *расположения швов* в конструкции сварку выполняют в разных пространственных положениях, основными из которых являются: нижнее, горизонтальное, вертикальное и потолочное (рис. 1.5).

По *характеру выполнения* различают одно- и двусторонние швы, выполняемые как на весу, так и на различного рода подкладках и флюсовых подушках.

Часть двустороннего шва, выполняемую предварительно для предотвращения прожогов при последующей сварке или накладываемую в последнюю очередь в корень шва для обеспечения высокого качества шва, называют *подварочным швом*.

По *условиям работы* швы подразделяют на *рабочие*, воспринимающие внешние нагрузки, и *связующие* (соединительные), предназначенные только для скрепления частей изделия и не рассчитанные на восприятие внешних нагрузок.

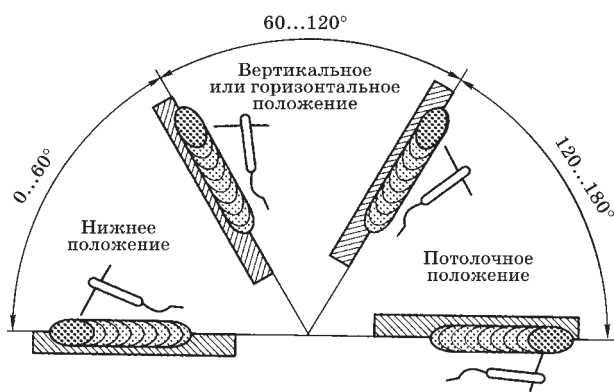


Рис. 1.5
Основные пространственные положения сварки:
1 — нижнее; 2 — вертикальное или горизонтальное; 3 — потолочное.

Изображения и обозначения швов сварных соединений на чертежах изделий должны соответствовать Единой системе конструкторской документации (ЕСКД). Независимо от вида сварки видимый шов сварного соединения условно изображают сплошной основной линией, а невидимый — штриховой. Обозначение шва отмечают линией-выноской, заканчивающейся односторонней стрелкой. Характеристика шва, расположенного на лицевой стороне листа (видимый шов), проставляется над полкой линии-выноски, а под полкой — для шва на обратной стороне листа (невидимый шов). Структура условного обозначения стандартного шва приведена на рисунке 1.6.

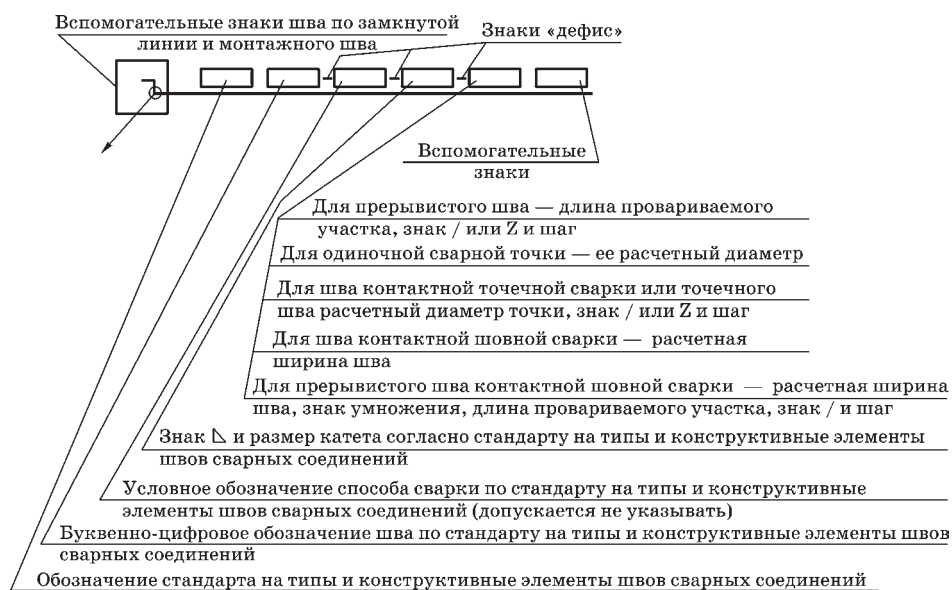


Рис. 1.6
Структура условных обозначений сварных швов на чертежах изделий

Ниже перечислены основные стандарты на виды и конструктивные элементы швов сварных соединений для различных видов сварки:

- ГОСТ 5264-80 «Ручная дуговая сварка. Соединения сварные»;
- ГОСТ 8713-79 «Сварка под флюсом. Соединения сварные»;
- ГОСТ 14771-76 «Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные»;
- ГОСТ 15164-78 «Электрошлаковая сварка. Соединения сварные»;
- ГОСТ 14806-80 «Швы сварных соединений. Дуговая сварка алюминия и алюминиевых сплавов»;
- ГОСТ 16098-80 «Соединения сварные из двухслойной коррозионно-стойкой стали»;
- ГОСТ 16038-80 «Швы сварных соединений трубопроводов из меди и медно-никелевого сплава»;
- ГОСТ 11533-75 «Автоматическая и полуавтоматическая дуговая сварка под флюсом. Соединения сварные под острыми и тупыми углами»;
- ГОСТ 27580-88 «Дуговая сварка алюминия и алюминиевых сплавов. Соединения сварные под острыми и тупыми углами».

Этими стандартами в зависимости от толщины металла устанавливаются формы поперечного сечения сварного шва и размеры конструктивных элементов подготовленных кромок и выполненных швов, которым присваивают условные буквенно-цифровые обозначения.

Буквенная часть указывает на вид сварного соединения: С — стыковое; У — угловое; Т — тавровое; Н — нахлесточное. Цифры являются порядковым номером типа шва в данном конкретном стандарте.

Условные обозначения основных способов сварки следующие: Р — ручная дуговая сварка (штучным электродом); ЭЛ — электроннолучевая сварка; Ф — дуговая сварка под слоем флюса; ПЛ — плазменная и микроплазменная сварка; УП — сварка в активном газе (или смеси активного и инертного газов) плавящимся электродом; ИП — сварка в инертном газе плавящимся электродом; ИН — сварка в инертном газе неплавящимся электродом; Г — газовая сварка.

Сварные швы подразделяются также *по положению в пространстве* (рис. 1.7).

По *протяженности* различают швы непрерывные (сплошные) и прерывистые. *Непрерывный шов* — это сварной шов без промежутков по длине, *прерывистый шов* имеет промежутки по длине. Прерывистые швы могут быть цепными или шахматными (рис. 1.8а).

По отношению к *направлению действующих усилий* швы подразделяют на: продольные, поперечные, комбинированные и косые (рис. 1.8б).

Для обозначения сварных швов используют также вспомогательные знаки (табл. 1.1). Все элементы условного обозначения располагаются в указанной последовательности и отделяются друг от друга дефисом. Буквенные обозначения способа сварки необходимо проставлять на чертеже только в случае применения в данном изделии нескольких видов сварки. Можно не указывать на полке мини-выноски обозначения стандарта, если все швы в изделии выполняются по одному стандарту. В этом случае следует сделать соответствующее указание в примечаниях на чертеже.

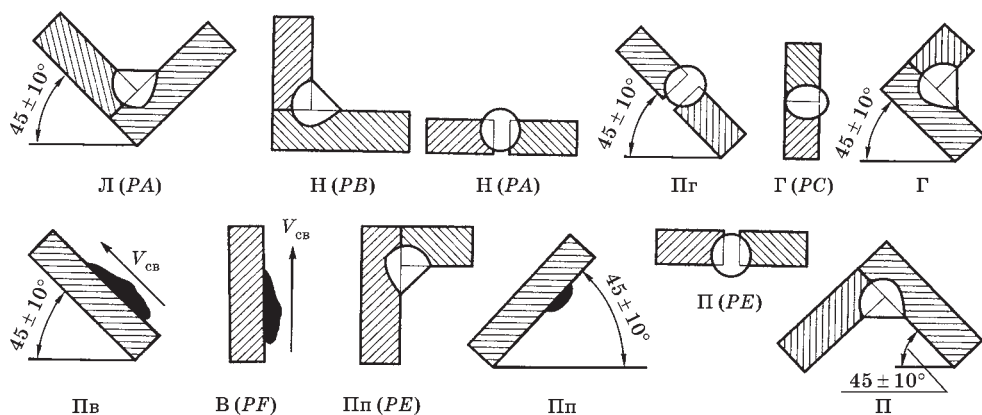


Рис 1.7

Обозначения (в скобках — международные) свариваемых в различных пространственных положениях швов:

нижнее — Н; «в лодочку» — Л; полугоризонтальные — Пг; горизонтальные — Г; полуввертикальные — Пв; вертикальные — В; полупотолочные — Пп; потолочные — П.

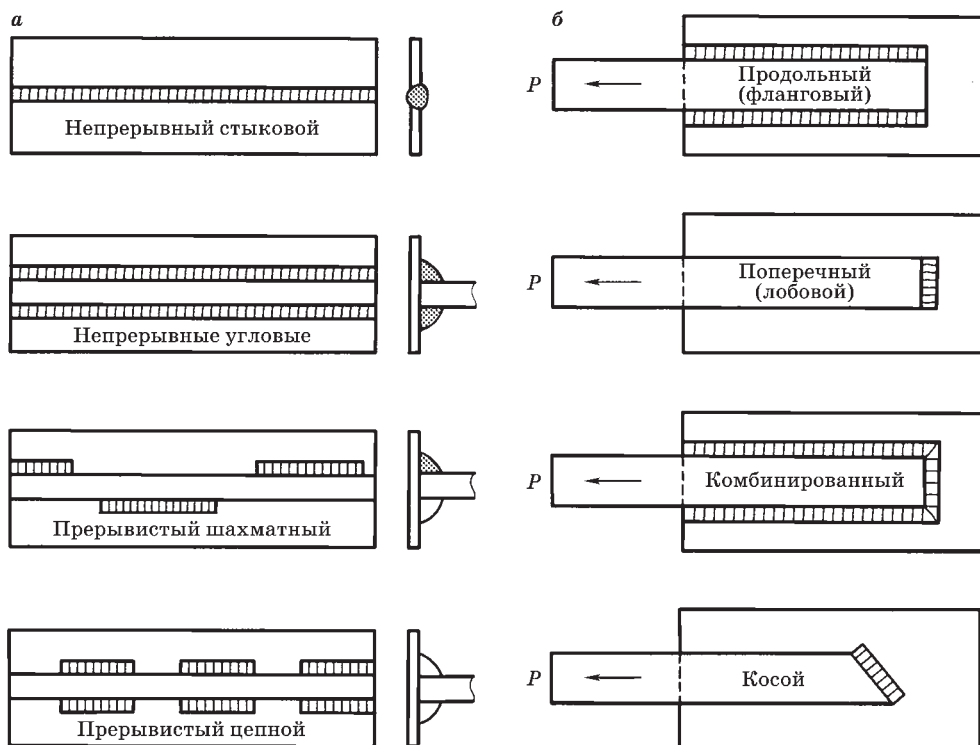


Рис. 1.8

Классификация сварных швов по протяженности (а) и по направлениям действующих усилий (б)

Таблица 1.1

Вспомогательные знаки для условного обозначения сварных швов

Вспомогательный знак	Значение вспомогательного знака	Расположение вспомогательного знака относительно линии-выноски для швов	
		с лицевой стороны	с обратной стороны
	Выпуклость шва снять		
	Наплывы с неровности шва обработать с плавным переходом к основному металлу		
	Шов выполнить при монтаже изделия		
	Прерывистый или точечный цепной шов		
	Прерывистый или точечный шахматный шов		
	Шов по замкнутой линии		
	Шов по незамкнутой линии		

Примеры условного обозначения сварных швов приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Условные обозначения сварных швов

Наименование сварного шва	Пример обозначения
Стыковой односторонний на остающейся подкладке, со скосом двух кромок, выполненный дуговой сваркой покрытыми электродами	ГОСТ 5264-80-C19
Стыковой двусторонний, с двумя симметричными скосами двух кромок, выполненный дуговой сваркой покрытыми электродами. Участки перехода от шва к основному металлу дополнительно обработаны	ГОСТ 5264-80-C25
Шов углового соединения односторонний, со скосом двух кромок, монтажный. Выпуклость шва снята механической обработкой	ГОСТ 5264-80-Y9
Шов таврового соединения невидимый односторонний, выполненный дуговой сваркой в углекислом газе плавящимся электродом. Шов прерывистый. Катет шва 6 мм, длина провариваемого участка 50 мм, шаг 150 мм	ГОСТ 14771-76-T1-УП
Стыковой двусторонний с двумя симметричными скосами двух кромок, выполненный ручной дуговой сваркой. Обозначение упрощенное, если стандарт указан в примечаниях на чертеже	C21
Одинаковые швы при обозначении одного из них № 1 (упрощенное обозначение)	№ 1

1.3.3. КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Торцовые поверхности деталей, подлежащие нагреву и расплавлению при сварке, называют *свариваемыми кромками*. Для обеспечения проплавления кромок в зависимости от толщины основного металла и способа сварки им придают оптимальную форму, предварительно подготавливая кромки.

При сварке тонкостенных деталей применяют отбортовку кромок. Для толстостенных деталей осуществляют разделку кромок, подлежащих сварке, в виде их наклонного прямолинейного или криволинейного скоса.

На рисунке 1.9 приведены применяемые формы кромок для различных типов сварных соединений. Основными геометрическими параметрами кромок и соединений, подготовленных и собранных под сварку, являются угол скоса и угол разделки кромок, притупление кромок, зазор, высота отбортовки и радиус закруглений.

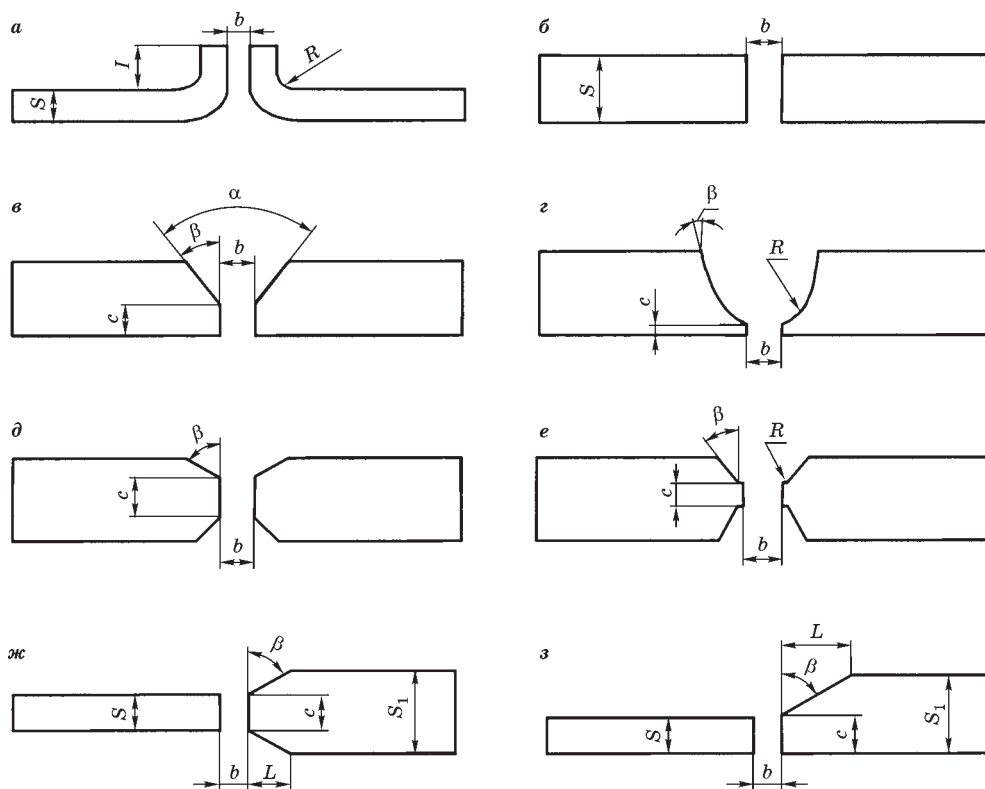


Рис. 1.9
Примеры а–з подготовки кромок под сварку

Угол скоса кромки называют острым углом β между плоскостью скоса кромки и плоскостью торца, угол α между скошенными кромками свариваемых частей — *углом разделки*.

Притуплением кромок называют длину s несошенной части торца кромок, подлежащей сварке. При одностороннем и двустороннем скосе кромок острый край притупляют для правильного формирования шва и предотвращения образования прожогов.

Зазор — кратчайшее расстояние b между кромками собранных для сварки деталей. Зазор при сборке под сварку определяется толщиной и химическим составом свариваемых сплавов, способом сварки, конструкцией соединяемых деталей и типом соединения.

От типа и угла разделки кромок зависит количество необходимого электрода металла для заполнения разделки, а значит, и производительность сварки. Двусторонний скос кромок, по сравнению с односторонним, позволяет уменьшить объем наплавленного металла в 1,6–1,7 раза. Кроме того, такая разделка обеспечивает меньшую величину деформаций после сварки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие условия необходимы для получения сварного соединения?
2. По каким признакам классифицируют виды сварочных процессов?
3. Какие зоны включает в себя сварное соединение?
4. Перечислите типы сварных соединений и швов.
5. Какими геометрическими параметрами характеризуется разделка кромок?

2.1. НАЗНАЧЕНИЕ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Сварочные материалы — материалы, обеспечивающие возможность протекания сварочного процесса и получение качественного сварного соединения.

К ним относят материалы, участвующие и не участвующие в образовании металла шва.

К материалам, непосредственно участвующим в образовании металла шва, относят: электроды плавящиеся покрытые, сварочные электродные проволоки, присадочные электродные проволоки, присадочные прутки, флюсы, активные защитные газы и газовые смеси, горючие газы, порошковые присадочные материалы и др.

К материалам, не влияющим на состав металла шва, относят: неплавящиеся электроды (угольные, вольфрамовые и др.), инертные защитные газы (аргон, гелий и их смеси) и др.

С помощью сварочных материалов реализуют процесс сварки и осуществляют сложную физико-химическую обработку электродного и основного металла, производимую в газовой и шлаковой фазах и завершающуюся в сварочной ванне, что приводит к образованию шва нужного состава с требуемыми свойствами. Кроме этого используют материалы для очистки металла шва от вредных примесей и газов (серы, фосфора, водорода, азота и др.), для удаления включений окислов и шлаков, для измельчения первичной структуры металла шва. Такую обработку обычно называют металлургической.

Применение сварочных материалов необходимо и для обеспечения стабильности сварочного процесса, для получения требуемых размеров сварного шва, для защиты расплавленного электродного и основного металлов, а также нагретого твердого металла от вредного воздействия атмосферного воздуха в течение всего процесса сварки.

Невозможно реализовать ни один из способов сварки плавлением без применения сварочных материалов.

Классификация сварочных материалов в связи с их большим разнообразием довольно затруднена. Сварочные материалы разрабатывают применительно к конкретным свариваемым материалам и способам сварки.

Некоторое представление об их классификации дает схема, приведенная на рисунке 2.1.

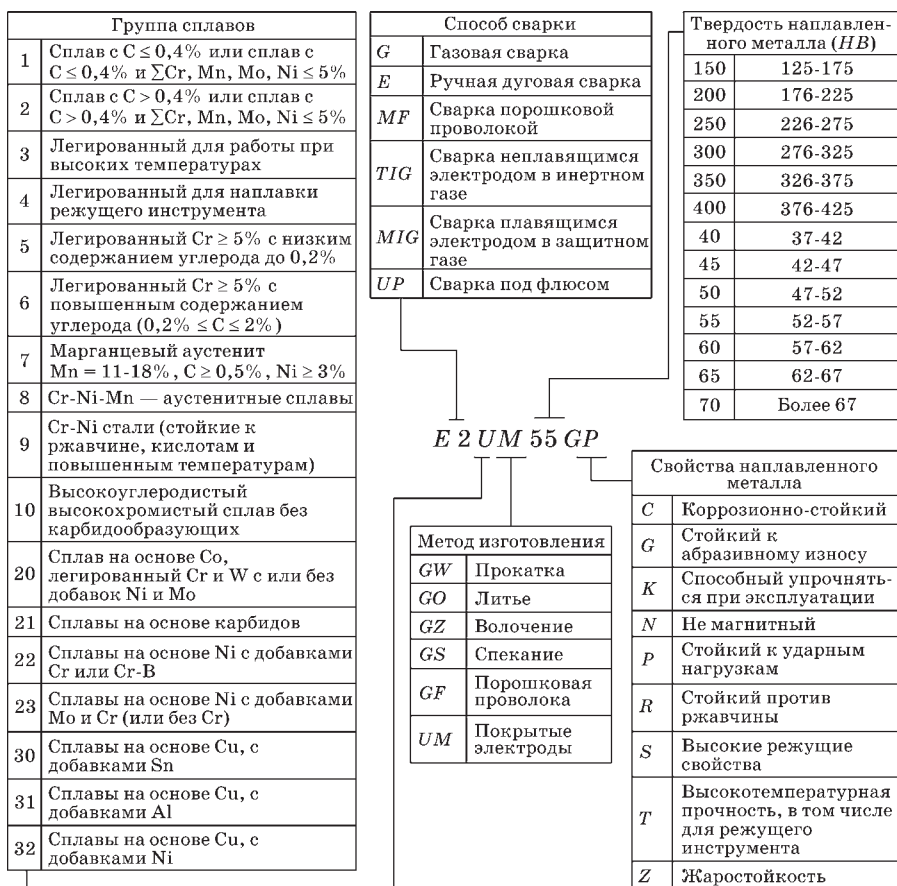


Рис. 2.1
Классификация материалов для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей в соответствии с DIN 8555

Немецкий стандарт DIN 8555 дает классификацию и обозначение материалов по назначению (группе свариваемых сплавов), способу сварки, характеристикам наплавленного металла (твердости и свойствам) и указывает метод изготовления сварочного материала.

На рисунке приведено обозначение покрытых электродов для ручной дуговой сварки сплавов группы 2, которые обеспечивают наплавленный металл, стойкий к абразивному износу, к ударным нагрузкам и обладающий твердостью $HB = 52-57$.

В главе будем использовать определения по ГОСТ 2601-84 «Сварка металлов. Термины и определения основных понятий», обязательные для применения в документации всех видов, научно-технической, учебной и справочной литературе.

Сварочные материалы используют и в качестве присадочного металла.

Присадочный металл — металл для введения в сварочную ванну в дополнение к расплавленному основному металлу.

Присадочный (дополнительный) металл обычно требуется для получения шва с необходимыми геометрическими размерами. В большинстве случаев при сварке стыковых швов расплавление только кромок основного металла не обеспечивает получение выпуклости шва, заполнение зазора и разделки кромок. При сварке угловых швов присадочный металл необходим для получения нужного сечения шва.

Присадочный металл используют и для получения наплавленного металла.

Наплавленный металл — переплавленный присадочный металл, введенный в сварочную ванну или наплавленный на основной металл.

Если дополнительный металл в процессе сварки расплавляется в виде сварочной (электродной) проволоки, стержней и т.д., включенных в сварочную цепь, он обычно называется электродным, а если он не включен в сварочную цепь — присадочным.

2.2. СВАРОЧНАЯ СПЛОШНАЯ И ПОРОШКОВАЯ ПРОВОЛОКА, ЛЕНТЫ, ПРУТКИ, ПОРОШКИ

Сварочная проволока — проволока для использования в качестве плавящегося электрода либо присадочного металла при сварке плавлением.

Плавящийся электрод для дуговой сварки — металлический электрод, включаемый в цепь сварочного тока для подвода его к сварочной дуге, расплавляющийся при сварке и служащий присадочным металлом.

Присадочная проволока — сварочная проволока, используемая как присадочный металл и не являющаяся электродом.

Электродная проволока — сварочная проволока для использования в качестве плавящегося электрода.

Сварочная проволока используется в качестве электродной проволоки и присадочной проволоки.

Сварочную проволоку изготавливают сплошной или порошковой.

Для электрошлаковой сварки наряду с проволочными электродами применяют пластинчатые электроды, изготовленные из ленты или листов.

2.2.1. СВАРОЧНАЯ СПЛОШНАЯ ПРОВОЛОКА

Среди сварочных материалов сварочные проволоки сплошного сечения используются в наибольшем объеме. Их широко применяют в качестве электродной проволоки при сварке и наплавке плавящимся электродом в среде защитных газов и под флюсом и как присадочную проволоку при сварке и наплавке неплавящимся электродом в среде защитных газов и газовой сварке. Кроме этого, сплошную проволоку применяют при изготовлении покрытых электродов для дуговой сварки.

Сварочную проволоку изготавливают из различных металлов и сплавов.

Сварочную проволоку получают горячей прокаткой и волочением. Если металл шва должен иметь высокую твердость, то проволока плохо деформируется в горячем и холодном состояниях. В этом случае сварочную проволоку изготавливают литьем в виде присадочных прутков длиной до 1000 мм.

Сварочные проволоки выпускают в соответствии с различными стандартами и техническими условиями. Возможность применения сварочной проволоки данной марки отечественной или импортной, изготовленной в соответствии с конкретным стандартом или техническим условием для сварки конкретного изделия определяется нормативными документами на сварку изделий данной группы технических устройств. На основе многолетнего опыта разработаны государственные стандарты:

- ГОСТ 2246-70. «Проволока стальная сварочная».
- ГОСТ 10543-98. «Проволока стальная наплавочная».
- ГОСТ 7871-75. «Проволока сварочная из алюминия и алюминиевых сплавов».
- ГОСТ 16130-90. «Проволока и прутки из меди и сплавов на медной основе сварочные».

В каждом из ГОСТов приведены сведения о химическом составе, о диаметрах проволок, о допусках на них, приведены правила приемки, методы испытаний, упаковки, транспортировки и хранения.

Требования ГОСТ 2246-70 распространяются на холоднотянутую сварочную проволоку из низкоуглеродистой, легированной и высоколегированной стали. Этот стандарт регламентирует химический состав 77 марок сварочной проволоки, используемых в качестве электродной, присадочной, наплавочной и для изготовления покрытых электродов для ручной дуговой сварки. Стандарт не регламентирует механические свойства металла шва, так как они зависят от многих других факторов (доли участия основного металла, марки флюса, защитного газа, режима сварки и т. д.).

В стандарте предусмотрены диаметры проволок (мм): 0,3; 0,5; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 12,0 и предельные отклонения по ним. Для получения проволок с минимальным содержанием вредных примесей, газов, неметаллических включений по требованию потребителя проволока может быть изготовлена из стали, выплавленной электрошлаковым (Ш), вакуумнодуговым (ВД) переплавом или в вакуумноиндукционных печах (ВИ). По виду поверхности проволока выполняется омедненная или оцинкованная (О). Стандарт дает примеры условного обозначения проволок.

Пример условного обозначения проволоки для сварки (наплавки) диаметром 1,2 мм, марки Св-08Г2С с омедненной поверхностью:

Проволока 1,2 Св-08Г2С-О ГОСТ 2246-70.

Пример условного обозначения проволоки сварочной диаметром 4 мм, марки Св-04Х19Н9, предназначенной для изготовления электродов:

Проволока 4 Св-04Х19Н9-Э ГОСТ 2246-70.

Условные обозначения марок проволоки состоят из индекса Св (сварочная) и следующих за ним цифр и букв. Цифры, следующие за индексом Св, указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Последующие буквы указывают на содержание в проволоке химических элементов, обозначаемых следующими буквами: В — вольфрам; Г — марганец; Д — медь; М — молибден; Н — никель; С — кремний; Т — титан; Ф — ванадий; Х — хром; Ц — цирконий; Ю — алюминий.

Цифры, следующие за буквенными обозначениями химических элементов, указывают среднее содержание элемента в процентах. При содержании

элементов менее 2% цифра не ставится. Более точное содержание элементов дано в стандарте. Буква А в конце условных обозначений марок низкоуглеродистой и легированной проволоки указывает на повышенную чистоту металла по содержанию серы и фосфора. В проволоке марки Св-08АА двоякая буква А указывает на пониженное содержание серы и фосфора по сравнению с проволокой марки Св-08А. Для высоколегированных проволок не допускается содержание серы и фосфора свыше 0,035%.

Проволока выпускается в виде прутков, в кассетах, катушках и бухтах в герметичной упаковке. Масса используемых катушек зависит от диаметра проволоки и вида сварочного оборудования для механизированной или автоматической сварки и колеблется в пределах от 0,5 до 80 кг. При роботизированной сварке применяют и емкости массой до 250 кг.

При дуговой сварке сталей в защитных газах часть проволоки теряется на разбрызгивание. При этом капли расплавленного электродного металла покрывают основной металл. Трудоемкость очистки изделия сопоставима с трудоемкостью операции сварки. Поэтому ведутся работы по созданию проволок, обеспечивающих более устойчивое горение дуги. Одним из способов, уменьшающих разбрызгивание, является введение в состав проволок материалов с низкой работой выхода электронов. При этом присадки должны иметь температуру кипения, превышающую температуру кипения стали. Этим условиям удовлетворяют редкоземельные металлы, такие как церий, лантан, неодим и другие. Введение в проволоку марки Св-08Г2С редкоземельных элементов в количестве 0,01–0,07% улучшает перенос электродного металла при сварке в среде углекислого газа и уменьшает разбрызгивание.

- ГОСТ 10543-98 распространяется на горячекатаную и холоднокатаную проволоку из углеродистой, легированной и высоколегированной стали, предназначенную для механизированной электродуговой наплавки. В ГОСТе приведены твердость наплавленного металла и примерное назначение наплавленных изделий для каждой марки проволоки. Проволоки классифицируются по химическому составу.
- ГОСТ 7871-75 распространяется на тянутую и прессованную проволоку из алюминия и алюминиевых сплавов для сварки плавлением. ГОСТ предусматривает выпуск 14 марок тянутой и прессованной проволоки из алюминия (Al более 99,5%), алюминий-марганцевого сплава (СвАМц), алюминий-магниевого сплава (СвАМг3, СвАМг4 и др.), алюминий-кремнистых сплавов (СвАК5 и др.) диаметром 0,8–12,5 мм.
- ГОСТ 16130-90 «Проволока и прутки из меди и сплавов на медной основе сварочные» регламентирует химсостав, диаметры проволок (0,8-8,0 мм) и прутков (6 и 8 мм). Этот стандарт содержит также рекомендации по применению проволок и прутков.

2.2.2. СВАРОЧНАЯ ПОРОШКОВАЯ ПРОВОЛОКА

Порошковая проволока — сварочная проволока, состоящая из металлической оболочки, заполненной порошкообразными веществами.

Порошок (сердечник), состоящий из смеси минералов, руд, ферросплавов и металлов, предназначен для газоплазменной защиты, раскисления и легирования

расплавленного металла, а также для стабилизации дугового разряда. В качестве газообразующих материалов используют карбонаты кальция, магния, натрия (например, мрамор, магнезит, кальцинированную соду), и органические вещества (целлюлозу, крахмал, древесную муку). В качестве шлакообразующих материалов используют рутиловый концентрат, алюмосиликаты, окислы щелочноземельных металлов, флюоритовый концентрат. В качестве раскислителей применяют активные элементы, обладающие высоким сродством к кислороду, в виде ферросплавов (ферромарганец, ферросилиций и др.) и металлических порошков. Легирующие материалы, такие как марганец, кремний, хром, бор, никель и другие, обеспечивающие металлу шва необходимые свойства, вводят также в виде ферросплавов и металлических порошков. Введение дополнительного металла в виде железного порошка (до 30%) позволяет увеличить производительность наплавки и улучшить сварочно-технологические свойства. В качестве компонентов сердечника можно использовать порошки из различных материалов без обработки и связующих веществ. Это дает широкую возможность изменять составы порошковых сердечников и создавать такие композиции, которые невозможно получить в других сварочных материалах. По составу сердечника порошковые проволоки делятся, также как и электроды, по виду покрытия на: рутил-органические, рутиловые; рутил-основные и основные.

Оболочкой для большинства порошковых проволок для сварки и наплавки сталей, сплавов и чугуна является холоднокатаная лента толщиной 0,2–0,8 мм из низкоуглеродистой стали, имеющая высокую пластичность, необходимую для формования и волочения проволоки. Оболочка порошковой проволоки для сварки и наплавки цветных металлов соответствует свариваемому металлу.

По конструкции порошковые проволоки могут быть классифицированы на бесшовные (рис. 2.2а) и шовные (рис. 2.2б–д) с одним (рис. 2.2б) и двумя загибами (рис. 2.2в, г), а также двухслойные (рис. 2.2д). Шовную порошковую проволоку изготавливают из ленты. Введение части оболочки внутрь сердечника (рис. 2.2б–д) обеспечивает более равномерное плавление его и более эффективную защиту металла от воздуха. При размещении всех металлических порошков во внутренней части двухслойной конструкции проволоки (рис. 2.2д), а газообразующих и шлакообразующих материалов в наружной полости сердечника, обеспечивается лучшая защита расплавленного металла.

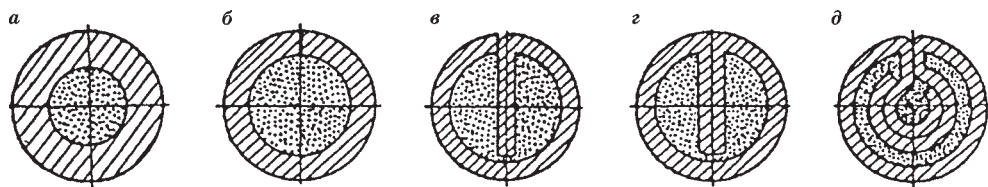


Рис. 2.2
Конструкции порошковой проволоки

Бесшовные проволоки (рис. 2.2а) изготавливают из пластичной трубы, заполненной наполнителем, волочением. Ее можно получать малого диаметра (до 1 мм) и обмеднять. Такая проволока негигроскопична. Отношение массы

порошкового наполнителя проволоки к массе оболочки находится в пределах 15–40%. Чем больше это отношение, тем легче обеспечить качественную защиту расплавленного металла и легирование металла шва.

По способу защиты порошковые проволоки делятся на самозащитные и используемые с дополнительной защитой зоны сварки газом или флюсом. Наиболее часто в качестве защитной среды используют углекислый газ. Сварка в углекислом газе порошковой проволокой имеет ряд преимуществ по сравнению со сваркой сплошной проволокой. Порошковая проволока, содержащая шлакообразующие и раскислители, позволяет хорошо раскислить металл сварочной ванны, интенсивно обработать его шлаком и снизить содержание в нем газов и неметаллических включений. Швы получаются гладкими, с плавным переходом от основного металла ко шву. Содержащиеся в сердечнике проволоки вещества, обеспечивающие стабильность горения дуги, приводят к минимальному разбрызгиванию и набрызгиванию на свариваемые детали.

Самозащитная проволока — электродная проволока, содержащая вещества, которые защищают расплавленный металл от вредного воздействия воздуха при сварке. Самозащитные проволоки содержат газообразующие и шлакообразующие вещества в достаточном количестве для сварки без дополнительной защиты газом.

Порошковая проволока — универсальный сварочный материал, пригодный для сварки сталей практически любого легирования и для наплавки слоев с особыми свойствами. Порошковую проволоку выпускают диаметром 1–3,2 мм. Для сварки во всех пространственных положениях используют в основном проволоки малых диаметров (чаще диаметром 1,2 мм).

Применение порошковых проволок позволяет обеспечивать производительность расплавления до 10–11 кг/ч, что выше, чем при сварке в углекислом газе сплошной проволокой (до 6–8 кг/ч), и выше, чем при ручной дуговой сварке покрытыми электродами (до 4 кг/ч).

ГОСТ 26271-84 дает классификацию, сортамент и технические требования на порошковую проволоку для сварки углеродистых и низколегированных сталей с временным сопротивлением до 900 МПа диаметром 1,2–6 мм.

По условиям применения сварочную порошковую проволоку подразделяют на газозащитную (ПГ), применяемую для сварки в углекислом газе или газовых смесях, и самозащитную (ПС) — для сварки без дополнительной защиты.

В соответствии с допустимыми пространственными положениями сварки и условиями формирования сварного шва проволоки подразделяют: для нижнего (Н); нижнего и горизонтального на вертикальной плоскости (Г); нижнего, горизонтального на вертикальной плоскости и вертикального (В); для всех положений (У); горизонтального на вертикальной плоскости с принудительным формированием шва (ГП); вертикального с принудительным формированием шва (ВП) и всех положений с принудительным формированием шва (УП).

Стандарт приводит марки отечественных порошковых проволок и дает пример их условного обозначения. Например, проволока марки ПП-АНЗ диаметром 3,0 мм, самозащитная (ПС), по значению предела текучести наплавленного металла типа 44, по химическому составу наплавленного металла категории А, обеспечивающей ударную вязкость наплавленного металла не ниже

35 Дж/см² при температуре –20°С (2), для сварки в нижнем положении (Н): ПП-АНЗ 3,0 ПС44-А2Н ГОСТ 26271-84.

2.2.3. ПРОВОЛОКА ПОРОШКОВАЯ НАПЛАВОЧНАЯ

Проволоки предназначены для наплавки поверхностных слоев для работы в условиях абразивного износа и износа от трения при больших удельных давлениях и повышенных температурах, а также в агрессивных средах. ГОСТ 26101-84 «Проволока порошковая наплавочная» приводит марки отечественных проволок, их химический состав, твердость наплавленного металла и типичные объекты (детали) наплавки.

В соответствии с ГОСТ 26101-84 различают проволоку, предназначенную для наплавки под флюсом (Ф), в защитном газе (Г), без дополнительной защиты — самозащитную (С) и универсальную (У) — для сварки под флюсом, в защитном газе и без дополнительной защиты.

По конструкции проволоки могут быть трубчатой стыковой (Т), трубчатой с нахлестом кромки (Н) и двухслойной (Д).

Условное обозначение наплавочной порошковой проволоки по стандарту, например, марки ПП-Нп-30Х5Г2СМ, трубчатой стыковой конструкции (Т), самозащитной (С), диаметром 2,6 мм: ПП-Нп-30Х5Г2СМ-Т-С 2,6 ГОСТ 26101-84.

2.2.4. ЛЕНТА ПОРОШКОВАЯ НАПЛАВОЧНАЯ

Для дуговой механизированной наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами применяют порошковые ленты (ПЛ), состоящие из металлической оболочки и порошка-наполнителя из легирующих материалов и флюса. В соответствии с ГОСТ 26467-85 выпускают ленты шириной 10–18 мм и толщиной 3 и 3,8 мм, предназначенные для наплавки под флюсом (Ф), или без дополнительной защиты (самозащитная порошковая лента) — С, или для наплавки под флюсом и без дополнительной защиты (универсальная порошковая лента) — У. Условное обозначение наплавочной порошковой ленты по стандарту, например, марки ПЛ-Нп-350Х25НЗСЗ двухзамковой универсальной: ПЛ-Нп-350Х25НЗСЗ-А-У ГОСТ 26467-85.

Порошковую ленту поставляют намотанную на кассеты.

2.2.5. ЛЕНТА НАПЛАВОЧНАЯ СПЕЧЕННАЯ

Наплавочную ленту спеченную (ЛС) изготавливают спеканием порошкообразных компонентов, обеспечивая ей необходимые прочностные и пластические свойства. Ленты поставляют потребителям в рулонах и применяют преимущественно при автоматической наплавке под флюсом для наплавки износостойких и коррозионностойких слоев.

2.2.6. ПРУТКИ ДЛЯ НАПЛАВКИ

Литые прутки для наплавки деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания с ударными нагрузками, а также при повышенных температурах в условиях коррозии и эрозии, согласно ГОСТ 21449-75* «Прутки для наплавки», выпускают диаметром 4, 5, 6 и 8 мм длиной 300–500 мм

пяти марок: 3 на основе железа — Пр-С27 (тип ПрН-У45Х28Н2СВМ), Пр-С1 (тип ПрН-У30Х28Н4С3), Пр-С2 (тип ПрН-У20Х17Н2) и 2 на основе кобальта — ПрВЗК (тип ПрН-У10ХК6ЗВ5), Пр-ВЗК-Р (тип ПрН-У20ХК57В10).

ГОСТ 16130-90 «Проволока и прутки из меди и сплавов на медной основе сварочные» приводит марки прутковых материалов для наплавки контактов в электротехнических приборах, для наплавки деталей, подверженных коррозии при работе в морской воде и в условиях, где необходимы коррозионная и износостойкость.

Выпускают прутки и из других металлов и сплавов длиной до 1000 мм для использования их в качестве дополнительного присадочного металла при ручных дуговых способах сварки неплавящимися электродами и газовой сварке.

2.2.7. ПОРОШКИ ДЛЯ НАПЛАВКИ И НАПЫЛЕНИЯ

Порошки применяют для наплавки и напыления плазменным или газопламенным способом износостойкого слоя на детали машин и оборудования, работающего в условиях воздействия абразивного изнашивания, коррозии, эрозии при повышенных температурах или в агрессивных средах. В соответствии с ГОСТ 21448-75* выпускают порошки с разной величиной частиц: 1,25–0,8 мм — крупный (К); 0,8–0,4 мм — средний (С); 0,4–0,16 мм — мелкий (М) и менее 0,16 мм — очень мелкий (ОМ). ГОСТом предусмотрено 8 марок порошков: ПГ-С27 (тип ПН-У40Х28Н2С2ВМ), ПГ-С1 (тип ПН-У30Х28Н4С4), ПГ-УС25 (тип ПН-У50Х38Н), ПГ-ФБХ6-2 (тип ПН-У45Х35ГСР), ПГ-АН1 (тип ПН-У25Х30СР), ПГ-СР2 (тип ПН-ХН80С2Р2), ПГ-СР3 (тип ПН-ХН80С3Р3). Порошки поставляют в металлических банках массой до 50 кг.

2.3. ПОКРЫТЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ И НАПЛАВКИ

2.3.1. ПОКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОДА

Покрытый электрод — плавящийся электрод для дуговой сварки, имеющий на поверхности покрытие, адгезионно связанное с металлом электрода.

Покрытие электрода — смесь веществ, нанесенная на электрод для усиления ионизации, защиты от вредного воздействия среды и металлургической обработки металла сварочной ванны.

В покрытие электрода вводят следующие материалы (компоненты): ионизирующие, газообразующие, шлакообразующие, легирующие, раскисляющие, связующие и формовочные.

Ионизирующие, или стабилизирующие, компоненты вводят для обеспечения устойчивого горения дуги. Они содержат элементы с низким потенциалом ионизации, такие как калий, кальций, которые содержатся в меле, полевом шпате и граните, а также натрий и др.

Газообразующие компоненты вводят для создания газовой защиты зоны дуги и сварочной ванны. К ним относятся органические вещества: крахмал, пищевая мука, декстрин и др., а также неорганические вещества: обычно

карбонаты (мрамор CaCO_3 , магнезит MgCO_3) и др. Газовая защита образуется в результате диссоциации органических веществ при температуре выше 200°C и диссоциации карбонатов при температуре около 900°C . Процесс диссоциации происходит недалеко от торца электрода. При обычном составе электродных покрытий на каждый грамм металла электродного стержня выделяется $90\text{--}120\text{ см}^3$ защитного газа, состоящего из углекислого газа CO_2 , угарного газа CO , водорода H_2 и кислорода O_2 . При этом обеспечивается достаточно надежное отеснение воздуха из зоны сварки и попадание очень небольшого количества азота в металл шва (не свыше $0,02\text{--}0,03\%$).

Шлакообразующие компоненты вводят для образования жидких шлаков. В качестве шлакообразующих используют руды и минералы: ильменит, рутил, полевой шпат, кремнезем, гранит, мрамор, плавиковый шпат и др. В состав шлакообразующих входят окислы CaO , MgO , MnO , FeO , Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , Na_2O , плавиковый шпат CaF_2 и др. Имеющиеся в покрытии ферросплавы связывают кислород, который отдают при нагревании шлакообразующие окислы, входящие в покрытие. Жидкий шлак, покрывая расплавленный металл электродных капель и сварочной ванны, химически взаимодействуя с расплавленным металлом, раскисляет металл шва и связывает окислы в легкоплавкие соединения. В то же время происходит легирование металла шва элементами, содержащимися в шлаке. Жидкий шлак пропускает (впитывает в себя) газы, выделяющиеся в процессе химических реакций в жидком металле, и формирует поверхность сварного шва.

Легирующие компоненты предназначены для придания металлу шва повышенных механических свойств, жаростойкости, износостойкости, коррозионной стойкости и других свойств. Легирующими элементами служат хром, марганец, титан, ванадий, молибден, никель, вольфрам и другие элементы. Легирующие элементы вводят в покрытие в виде ферросплавов и чистых металлов.

Раскисляющие компоненты вводят для раскисления (восстановления) части расплавленного металла, находящегося в виде окислов. К ним относятся элементы, имеющие большее, чем железо (при сварке сталей), сродство к кислороду и другим элементам, окислы которых требуется удалить из металла шва. Большинство раскислителей вводится в электродное покрытие в виде ферросплавов.

Связующие компоненты применяют для связывания порошковых составляющих покрытия в однородную вязкую массу, которая будет крепко удерживаться на стержне электрода при опрессовке и образовывать прочное покрытие после сушки и прокалки. В качестве связующих чаще всего применяют водные растворы натриевого ($\text{Na}_2\text{O SiO}_2$) или калиевого ($\text{K}_2\text{O SiO}_2$) жидкого стекла.

Формовочные компоненты — вещества, придающие обмазочной массе лучшие пластические свойства: бентонит, каолин, декстрин, слюда и др.

Некоторые материалы в покрытии выполняют несколько функций, например: мрамор является одновременно стабилизирующим, шлакообразующим и газозащитным компонентом, а ферросплавы — легирующими и раскисляющими компонентами.

Покрытие электродов оказывает существенное влияние на весь процесс сварки. Поэтому к покрытию предъявляются следующие требования:

обеспечение стабильного горения дуги; получение металла шва с необходимым химическим составом и свойствами; спокойное, равномерное плавление электродного стержня и покрытия; хорошее формирование шва и отсутствие в нем пор, шлаковых включений и др.; легкая отделимость шлака с поверхности шва после остывания; хорошие технологические свойства обмазочной массы, не затрудняющие процесса изготовления электродов; удовлетворительные санитарно-гигиенические условия труда при изготовлении электродов и сварке. Состав покрытия определяет и такие важные технологические характеристики электродов как: род и полярность сварочного тока, возможность сварки в различных пространственных положениях или определенным способом (сварка опиранием, наклонным электродом и т. д.). Состав покрытия электродов и свойства образующихся шлаков определяют и величину рекомендуемого для сварки тока. Для получения качественных сварных швов покрытие электрода должно удерживаться на металлическом стержне и быть сплошным до конца использования электрода (огарка), чтобы обеспечить необходимую защиту зоны сварки. Поэтому нагрев металлического стержня, определяемый величиной сварочного тока, к концу расплавления электрода не должен быть более 500°C, а с покрытиями, содержащими органические вещества, не более 250°C.

К физическим свойствам шлака, образуемого покрытием, относят температуру плавления, температурный интервал затвердевания, теплоемкость, теплопроводность, теплосодержание, вязкость, газопроницаемость, плотность, поверхностное натяжение, тепловое расширение (линейное и объемное). Все электродные покрытия должны обеспечивать при их плавлении плотность шлака ниже плотности жидкого металла для обеспечения всплывания шлака из сварочной ванны. Температурный интервал затвердевания шлака должен быть ниже температуры кристаллизации металла сварочной ванны для пропускания газов, выделяющихся из сварочной ванны. Наилучшие качества при сварке имеют шлаки, если температура плавления их составляет 1100–1200°C. В зависимости от изменения вязкости шлака от температуры различают шлаки «длинные» и «короткие». «Длинные» шлаки, у которых переход от жидкого к твердому состоянию растянут на значительный температурный интервал, при прочих равных условиях хуже обеспечивают формирование шва. У «коротких» шлаков возрастание вязкости расплавленного шлака с понижением температуры происходит быстро и закристаллизовавшийся шлак препятствует стеканию металла шва, находящегося еще в жидком состоянии при сварке в различных пространственных положениях. «Короткие» шлаки дают электроды с основным покрытием. Вязкость шлака имеет важное значение. Чем менее вязок шлак, тем больше его подвижность, а следовательно, физическая и химическая активность, тем быстрее в нем протекают химические реакции и физические процессы растворения окислов, сульфидов и т. п. Кислые шлаки обычно бывают очень вязкими и длинными, при этом вязкость возрастает с повышением кислотности.

Затвердевшие шлаки должны иметь небольшое сцепление с металлом, коэффициенты линейного расширения шлака и металла должны быть различными для более легкого отделения шлака со шва.

К химическим свойствам относится способность шлака раскислять металл шва, связывать окислы в легкоплавкие соединения и легировать металл шва.

К сварочно-технологическим свойствам электродов относят легкое возбуждение дуги, стабильное горение дуги на оптимальных режимах для данного диаметра и марки, возможность сварки на постоянном и переменном токах, пригодность для сварки в различных пространственных положениях. Кроме этого, покрытие должно плавиться равномерно, без чрезмерного разбрызгивания, отваливания кусков и образования козырька, препятствующего нормальному плавлению электрода. Образующийся при сварке шлак должен обеспечить благоприятную гладкую форму шва и легко удаляться после охлаждения.

2.3.2. ВИДЫ ЭЛЕКТРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ

ГОСТ9466-75 «Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки сталей и наплавки. Классификация, размеры и общие технические требования» подразделяет электроды на следующие виды: А — с кислым покрытием; Б — с основным покрытием; Ц — с целлюлозным покрытием; Р — с рутиловым покрытием; П — с покрытием прочих видов. С покрытием смешанного вида используют соответствующее двойное обозначение. Если покрытие содержит железный порошок в количестве более 20%, к обозначению вида покрытия добавляют букву Ж.

У электродов с *кислым покрытием* (А) шлакообразующую основу составляют железные (гематит — Fe_2O_3) и марганцевые (MnO_2) руды и кремнезем (SiO_2). Газовая защита расплавленного металла осуществляется органическими компонентами, сгорающими в процессе плавления электрода. В качестве раскислителей в покрытие вводят ферромарганец. Образующиеся кислые шлаки не содержат CaO и не очищают металл от серы и фосфора. В наплавленном металле много растворенного кислорода (до 0,12%), водорода (до 15 см³ в 100 г металла) и неметаллических включений. В результате швы обладают пониженной стойкостью к образованию горячих трещин и пониженной ударной вязкостью. Электроды непригодны для сварки сталей, легированных кремнием и другими элементами, так как они интенсивно окисляются. При сварке спокойных низкоуглеродистых сталей с высоким содержанием кремния возможно образование пор. При сварке выделяется много токсичной пыли, содержащей окислы марганца и кремния и происходит повышенное разбрызгивание. Достоинствами этих электродов являются: стабильное горение дуги на постоянном и переменном токах; возможность сварки в различных пространственных положениях; отсутствие пор при наличии на свариваемых поверхностях окалина или ржавчины, а также при случайном удлинении дуги; достаточно высокая скорость расплавления и высокая проплавливающая способность. Типичными для этого вида покрытия являются электроды марок МЭЗ-04 и СМ-5. В настоящее время электроды с кислым покрытием выпускают в малом объеме. Эти электроды применяют для сварки неответственных металлоконструкций.

У электродов с *рутиловым видом покрытия* (Р) шлакообразующую основу составляют: рутиловый концентрат, содержащий до 45% рутила (TiO_2); алюмосиликаты — слюда ($\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), полевой шпат ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$),

каолин ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) и др.; карбонаты — мрамор (CaCO_3) и магнезит (MgCO_3). Газовая защита расплавленного металла обеспечивается введением органических соединений (до 5%), а также разложением карбонатов. Наплавленный металл раскисляется и легируется ферромарганцем (до 10–15%). Поскольку окислительная способность рутилового покрытия меньше, чем кислого, количество марганца в нем ниже и его гигиенические характеристики гораздо лучше, чем у кислого. Содержание окислов марганца в аэрозоле при сварке меньше, чем у кислого в 3–5 раз. По качеству наплавленного металла электроды занимают промежуточное положение между электродами с кислым и основным покрытиями. Электроды обладают высокими сварочно-технологическими свойствами: обеспечивают отличное формирование шва с плавным переходом к основному металлу, малое разбрызгивание, легкую отделимость шлака, стабильное горение дуги на постоянном и переменном токах, сварку во всех пространственных положениях. Металл шва мало склонен к образованию пор при колебаниях длины дуги, при сварке по окисленной и загрязненной поверхности. Наплавленный металл соответствует по химическому составу полуспокойной или спокойной стали. К электродам с покрытием этого вида относятся электроды марок АНО-4, ОЗС-12 и др. Для повышения коэффициента наплавки в покрытия этого вида часто вводят порошок железа. При содержании железа в покрытии до 35% от массы покрытия (в электродах марок АНО-5, ОЗС-6 и др.) электродами можно варить в различных пространственных положениях. Электроды, содержащие в покрытии железного порошка 50–65% (например, электроды марок АНО-1, ОЗС-3 и др.) предназначены для высокопроизводительной сварки швов большой протяженности изделий толщиной 10–20 мм. Разбавляя металл сварочной ванны низкоуглеродистым железным порошком, можно существенно увеличить стойкость металла шва к образованию кристаллизационных трещин. Электроды с рутиловым видом покрытия применяют для сварки металлоконструкций и трубопроводов из углеродистых и низколегированных сталей с временным сопротивлением до 490 МПа.

Электроды с *основным видом покрытия* (Б) имеют шлакообразующую основу покрытия, состоящую из карбонатов (мрамор, мел, магнезит) и фторидов кальция (например, плавиковый шпат — CaF_2). Газовая защита расплавленного металла обеспечивается углекислым газом и окисью углерода, образующимися при диссоциации карбоната кальция в процессе нагрева и плавления покрытия. В качестве раскислителей покрытие может содержать ферромарганец, ферросилиций, ферротитан и ферроалюминий. Покрытия этого вида слабоокисленные, поэтому позволяют легировать расплавленный металл элементами с большим сродством к кислороду. Легирование осуществляется марганцем и кремнием при переходе их из ферромарганца и ферросилиция в сварочную ванну, что придает соединению высокую прочность. Кроме этого, для легирования в покрытие могут вводить металлические порошки. Наличие в покрытии большого количества соединений кальция, хорошо связывающих серу и фосфор с выделением их в шлак, обеспечивает высокую чистоту наплавленного металла с малым содержанием серы и фосфора. Плавиковый шпат при высоких температурах разлагается с выделением атомарного

фтора, который связывает водород в устойчивую, нерастворимую в металле молекулу HF. В результате наплавленный металл содержит незначительное количество водорода (4–10 см³ в 100 г наплавленного металла). Применение в покрытии активных раскислителей (титана, алюминия и кремния) обеспечивает низкое содержание кислорода в металле шва (менее 0,05%). Поэтому наплавленный металл мало склонен к старению, стоек к образованию кристаллизационных трещин и имеет повышенные пластические свойства при низких температурах. Сварочно-технологические свойства электродов с основным видом покрытия ниже, чем у электродов с другим видом покрытия. Образование большого количества отрицательных ионов фтора при плавлении покрытия приводит к уменьшению проводимости дугового разряда и снижению устойчивости горения дуги. Поэтому сварку электродами с основным видом покрытия осуществляют на постоянном токе обратной полярности. Для сварки переменным током необходимо применение электродов с дополнительным содержанием ионизирующих элементов в покрытии, например калия (в электродах марок СМ-11 и УП-1/55), или применение электродов со специальным двухслойным покрытием (например, электроды марки АНО-Д). Наличие влаги, масла, окалина или ржавчины на свариваемых кромках, наличие влаги в покрытии, а также увеличение длины дуги приводят к образованию пор в металле шва. Перед сваркой необходима проковка электродов при температуре 350–400 °С в течение одного часа. Для получения качественных швов необходимо строго соблюдать требования по подготовке изделия и выдерживать технологический режим процесса сварки. Электроды с основным видом покрытия предназначены для сварки ответственных конструкций из углеродистых, низколегированных и легированных сталей. Электроды с основным видом покрытия иногда называют электродами с фтористокальциевым покрытием.

Электроды с *целлюлозным видом покрытия* (Ц) содержат много (до 50%) органических составляющих (целлюлозу, травяную муку и т. п.) для образования большого количества газов. В качестве шлакообразующих применяют чаще всего рутил, карбонаты, алюмосиликаты и др. Иногда добавляют асбест — $\text{CaO } 3\text{MgO } 4\text{SiO}_2$. Для раскисления наплавленного металла добавляют ферромарганец. При сварке на торце электрода образуется конусная втулка из нерасплавившегося покрытия, что способствует образованию направленного потока газов, который обеспечивает оттеснение жидкого металла из-под дуги и более глубокое проплавление основного металла. Эти электроды (марок ВСЦ-4А и др.) используют для сварки корневого слоя шва неповоротных стыков трубопроводов методом опирания сверху вниз с высокой скоростью, достигающей 25 м/ч. Они обеспечивают хорошую обратную сторону шва, поэтому отпадает необходимость в подварке шва изнутри. Для выполнения заполняющих и облицовочных швов при сварке ответственных конструкций из низколегированных сталей во всех пространственных положениях предназначены, например, электроды марки ВСЦ-60.

К электродам с *смешанным видом покрытия* относят электроды с рутилово-основным (рутилкарбонатным или карбонатно-рутиловым) видом покрытия (РБ), электроды с кислоруттиловым видом покрытия (АР), с рутилово-

целлюлозным видом покрытия (РЦ) и др. К электродам с кислородно-целлюлозным видом покрытия относят электроды марки ОМА-2, предназначенные для сварки тонколистовых конструкций (толщиной 1–3 мм) из углеродистых и низколегированных сталей постоянным и переменным током. К электродам с кислородно-рутиловым (ильменитовым) видом покрытия относят электроды марок ОММ-5, АНО-6, АНО-6М, АНО-17 и др. Они содержат в покрытии ильменит ($\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$) и предназначены для сварки конструкций из углеродистых сталей во всех пространственных положениях постоянным и переменным током. Электроды с рутилово-основным видом покрытия появились в результате попыток объединить преимущества рутиловых и основных покрытий. Они предназначены для сварки оборудования из углеродистых и низколегированных сталей с временным сопротивлением до 490 МПа, когда к металлу сварных швов предъявляются повышенные требования по пластичности и ударной вязкости. К электродам с рутилово-основным видом покрытия относят электроды марок МР-3, АНО-30, ОЗС-28 и др.

Кроме указанных видов покрытий, имеются специальные электродные покрытия: гидрофобные, для сварки и наплавки цветных металлов и их сплавов и др. Гидрофобные покрытия предназначены для выполнения сварочных работ в особо влажных условиях: при повышенной влажности атмосферы, под водой и т. д. В них добавляют до 10% специальных гидрофобных полимеров, которые в процессе полимеризации заполняют поры между частицами покрытия и перекрывают пути проникновения влаги во внутренние слои покрытия. Для сварки лежачим и наклонным используют специальные электроды, например, электроды марок НЭ-1, НЭ-5, ОЗС-17Н и др. В этом случае часто применяют удлиненные электроды (до двух метров) и диаметром до 8 мм. Покрытие этих электродов обычно имеет повышенную толщину.

Конкретный состав покрытия и стержня в данном электроде определяет марка электрода. Обозначения марок часто содержат начальные буквы организации, в которой были разработаны электроды, и порядковый номер.

2.3.3. КЛАССИФИКАЦИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ

Электроды, предназначенные для ручной дуговой сварки, в стандартах классифицируются по следующим признакам: металлу, для сварки которого они предназначены; толщине и типу покрытия; механическим свойствам металла шва и др.

Согласно ГОСТ 9466-75 электроды для сварки и наплавки сталей в зависимости от назначения разделены на классы: для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с $\sigma_{\text{в}} < 600$ МПа — У (условное обозначение); для сварки легированных конструкционных сталей с $\sigma_{\text{в}} > 600$ МПа — Л; для сварки теплоустойчивых сталей — Т; для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами — В; для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами — Н. Этот стандарт регламентирует размеры электродов, толщину и типы покрытий, условные обозначения, общие технические требования, правила приемки и методы испытания.

2.4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ

В качестве характеристик плавления электродов используют линейную или массовую скорость плавления, измеряемую длиной или массой расплавленного электрода (проволоки) в единицу времени и коэффициент потерь электродного металла на угар и разбрызгивание. Скорость плавления зависит от состава сварочной проволоки, наполнителя порошковой проволоки, защитного газа, покрытия электрода, флюса, режима сварки, полярности тока и ряда других факторов.

Эти характеристики определяются экспериментально и позволяют судить о производительности и экономичности конкретного процесса сварки.

Производительность плавления электрода характеризуется коэффициентом расплавления. Коэффициент расплавления α_p представляет удельную (отнесенную к одному амперу сварочного тока) производительность процесса расплавления электрода:

$$\alpha_p = \frac{G_p}{I_{св} \cdot t} \cdot \frac{\Gamma}{A \cdot ч},$$

где G_p — масса расплавленного металла электрода (г) за время горения дуги t (ч); $I_{св}$ — сила сварочного тока, А.

При сварке порошковой проволокой

$$\alpha_p = \frac{G_{пров}(1 - K_з)}{I_{св} t},$$

где $K_з$ — коэффициент заполнения порошковой проволоки, оценивающий количество порошкового материала в сердечнике.

$$K_з = \frac{G_{пор}}{G_{пров}} \cdot 100\%,$$

где $G_{пор}$ — масса порошкового наполнителя; $G_{пров}$ — общая масса проволоки.

В зависимости от назначения проволоки коэффициент заполнения колеблется в широких пределах (15–40%).

Для электродов и порошковых проволок, содержащих в покрытии дополнительный металл (например, железный порошок), масса расплавленного металла

$$G_p = G_{ст.эл} + G_{доп.м},$$

где $G_{ст.эл}$ — масса расплавленной части металлического стержня электрода или оболочки порошковой проволоки; $G_{доп.м}$ — масса расплавленного дополнительного металла, содержащегося в покрытии электрода или в сердечнике порошковой проволоки.

Производительность наплавки характеризуется коэффициентом наплавки.

Коэффициент наплавки при сварке α_n — коэффициент, выраженный отношением массы металла G_n , наплавленной за единицу времени горения дуги, отнесенной к единице сварочного тока:

$$\alpha_n = \frac{G_n}{I_{св} \cdot t} \cdot \frac{\Gamma}{A \cdot ч},$$

где G_n — масса наплавленного металла (г) при силе сварочного тока $I_{св}$ (А) за время горения дуги t (ч).

Часто производительность наплавки оценивают массой металла, наплавленного в единицу времени:

$$\Pi_n = \frac{G_n}{t} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

Потери электродного металла при сварке на угар и разбрызгивание учитываются коэффициентом потерь ψ :

$$\psi = \frac{G_p - G_n}{G_p} \cdot 100\%.$$

Он выражает отношение потерь металла к массе расплавленного электродного металла.

Для электродов и порошковых проволок, содержащих в покрытии дополнительный металл,

$$\psi = \frac{(G_{ст.эл} + G_{доп.м}) - G_n}{(G_{ст.эл} + G_{доп.м})} \cdot 100\%.$$

Рассмотренные характеристики электродов используют для нормирования сварочных работ и расхода электродов. Например, если известны площадь наплавленного металла F_n и длина шва $l_{ш}$, то масса наплавленного металла шва

$$G_n = F_n l_{ш} \rho,$$

где ρ — плотность металла (для большинства сталей $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$).

По паспорту выбранной марки электродов для соответствующего диаметра электрода и пространственного положения сварки определяют $I_{св}$ и коэффициенты α_p , α_n и ψ . Основное время сварки определяют по формуле

$$t = G_n / \alpha_n I_{св}.$$

Массу электродов, необходимую для сварки данного шва, определяют по формуле

$$G_{эл} = K_p G_n,$$

где K_p — коэффициент расхода электродов на 1 кг наплавленного металла шва. Значение его приводят в паспорте конкретной марки электродов (обычно $K_p = 1,4 \dots 1,9$).

2.5. НЕПЛАВЯЩИЕСЯ ЭЛЕКТРОДЫ

Неплавящиеся электроды служат для обеспечения стабильного горения электрической дуги. Они должны обладать высокой стойкостью при высоких температурах. Поэтому наиболее широкое применение получили электроды из тугоплавких материалов: графита, имеющего температуру плавления 3900°C , и вольфрама с температурой плавления 3410°C .

Угольные электроды. Для воздушно-дуговой резки и сварки металлов, для удаления прибылей и дефектов литья, строжки прихваток и сварных швов,

для поверхностной резки металлов, срезки заклепок, подготовки кромок под сварку выпускают угольные электроды — омедненные и неомедненные, круглые — диаметром 4–18 мм и плоские сечением — 12×5 и 18×5 мм.

Вольфрамовые электроды. Электроды для дуговой сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов (аргона и гелия), а также для плазменных процессов сварки и резки, наплавки и напыления выпускают в соответствии с ГОСТ 23949-80 из чистого вольфрама и вольфрама с активирующими присадками (двуокиси тория, окиси лантана и окиси иттрия) диаметром 0,5–10 мм.

На поверхности электродов не должно быть раковин, расслоений, трещин, окислов, остатков технологических смазок, посторонних включений и загрязнений. Качество поверхности сильно влияет на время работы электрода до следующей перезаточки. Большей работоспособностью обладают электроды со шлифованной поверхностью.

Электроды должны быть прямыми. Непрямолинейность электродов не должна быть более 0,25% длины.

Введение в вольфрам присадок с меньшей величиной работы выхода электронов (окиси лантана, окиси иттрия и двуокиси тория) увеличивает эмиссию электронов с поверхности катода. Например, величина эмиссии с катода торированного вольфрама при температуре 3140 К примерно такая же, как у катода из чистого вольфрама при температуре 4000 К. Поэтому использование электродов с активирующими присадками позволяет значительно увеличить допустимый сварочный ток на электрод и увеличить работоспособность электрода.

2.6. ФЛЮСЫ ДЛЯ ДУГОВОЙ И ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ

Флюс для дуговой сварки — сварочный флюс, защищающий дугу и сварочную ванну от вредного воздействия окружающей среды и осуществляющий металлургическую обработку сварочной ванны.

В качестве флюсов используют специально приготовленные неметаллические порошки с размером отдельных зерен 0,25–4 мм в зависимости от марки флюса. Флюсы, расплавляясь, создают газовый и шлаковый купол над зоной сварочной дуги, а после химико-металлургического воздействия в дуговом пространстве и сварочной ванне образуют на поверхности шва шлаковую корку, в которую выводятся окислы, вредные примеси (сера, фосфор и др.) и газы.

В зависимости от свариваемых материалов и требований, предъявляемых при этом к металлургическим процессам, флюсы могут иметь самые различные композиции. Флюсы принято разделять в зависимости от способа их изготовления, назначения и химического состава.

По способу изготовления флюсы разделяют на неплавленные и плавленные.

Неплавленные флюсы могут быть керамическими, спеченными и в виде простейшей механической смеси (флюсы-смеси).

Керамический флюс — флюс для дуговой сварки, полученный перемешиванием порошкообразных материалов со связующим веществом, грануляцией и последующей термической обработкой. Технология изготовления керамических флюсов сходна с технологией изготовления покрытий электродов. Сухие

компоненты шихты замешивают на жидком стекле; полученную массу измельчают продавливанием через специальные устройства, сушат, прокаливают при тех же режимах, что и электродные покрытия, и просеивают для получения частиц определенного размера.

Спеченные флюсы изготавливают спеканием смеси компонентов шихты при повышенных температурах без их сплавления. Полученные комки измельчают до частиц требуемого размера.

Флюсы-смеси изготавливают механическим смешением крупинок различных материалов или флюсов. Большим недостатком механических смесей является склонность к разделению при транспортировке и в процессе сварки вследствие разницы в плотности, форме и размере крупинок. Поэтому флюсы-смеси недостаточно надежно обеспечивают стабильное качество сварных швов.

Из группы неплавленных флюсов наибольшее распространение получили керамические флюсы. Легирование металла такими флюсами достигается введением в них необходимых ферросплавов. Флюсы при изготовлении не подвергаются операции расплавления, поэтому количество и сочетание ферросплавов и других легирующих элементов может быть различным, что позволяет легко получать любой требуемый состав металла шва. Основная область их использования — сварка высоколегированных специальных сталей и наплавочные работы.

Плавленный флюс — флюс, полученный сплавлением его составляющих и последующей грануляцией расплава. Флюс представляет собой сплав окислов и солей металлов.

Принципиальное отличие плавленого флюса от керамического состоит в том, что плавленный флюс не может содержать легирующих элементов в чистом виде, в процессе выплавки они неизбежно окислятся. Легирование плавлеными флюсами происходит путем восстановления элементов из окислов, находящихся во флюсе.

В основу классификации флюсов по химическому составу положено содержание в них окислов и солей металлов. Различают окислительные флюсы, содержащие в основном окислы MnO и SiO_2 . Для получения необходимых свойств флюса в него вводят и другие составляющие, например плавиковый шпат, а также весьма прочные окислы CaO , MgO , Al_2O_3 , которые в сварочных условиях практически не реагируют с металлом.

Чем больше содержится во флюсе MnO и SiO_2 , тем сильнее флюс может легировать металл кремнием и марганцем, но и одновременно тем сильнее он окисляет металл. Чем сложнее легирована сталь, тем меньше должно содержаться во флюсе MnO и SiO_2 , в противном случае недопустимо возрастает окисление легирующих элементов в стали; нежелательным может быть и дополнительное легирование металла кремнием и марганцем. Поэтому окислительные флюсы преимущественно применяют при сварке углеродистых и низколегированных сталей. Безокислительные флюсы практически не содержат окислов кремния и марганца или содержат их в небольших количествах. В них входят фториды CaF_2 и прочные окислы металлов. Их преимущественно используют для сварки высоколегированных сталей.

Бескислородные флюсы целиком состоят из фторидных и хлоридных солей металлов, а также других составляющих, не содержащих кислород. Их

используют для сварки химически активных металлов (алюминия, титана и др.).

В связи с широким применением плавящихся флюсов на основные марки флюсов существует ГОСТ 9087-81 (в ред. 1990 г.) «Флюсы сварочные плавящиеся», в котором регламентирован химический состав 21 марки плавящихся флюсов, указаны цвет, строение и размеры зерна и даны рекомендации по области их применения.

Для двух марок флюсов АН-20 и АН-26 сделано разделение не только по размеру зерна, но и в зависимости от строения зерен флюса — стекловидного или пемзовидного характера. Строение зерен флюса зависит от состава расплава флюса, степени перегрева в момент выпуска в воду, в связи с чем флюс может получиться плотным, с прозрачными зернами — «стекловидный», либо пористым, рыхлым — «пемзовидный». Пемзовидный флюс при том же составе имеет в 1,5–2 раза меньший удельный вес. Эти флюсы хуже защищают металл от действия воздуха, но обеспечивают лучшее формирование швов при больших силах тока и скоростях сварки.

Флюсы различают также и по размеру зерен. Так, флюсы АН-348-А, ОСЦ-45, АН-20С, АН-26П имеют размер зерен 0,35–3 мм; флюсы АН-348-АМ, ОСЦ-45-М, ФЦ-9, АН-20С — 0,25–1,6 мм; флюсы АН-8, АН-22 и АН-26С — 0,35–4 мм и флюс АН-26-СП — 0,25–4 мм. Стекловидные флюсы с размером зерен не более 1,6 мм предназначены для сварки электродной проволокой диаметром не свыше 3 мм.

В обозначении марки флюса буквы означают: М — мелкий, С — стекловидный, П — пемзовидный, СП — смешанный. Пример условного обозначения флюса по стандарту: флюс АН-348-АМ — ГОСТ 9087-81. Для электрошлаковой сварки применяют флюсы общего назначения (АН-348-А, АН-22, 48-ОФ-6, АНФ-5) и флюсы, предназначенные именно для данного процесса (АН-8 и АН-25). Содержание в этих флюсах окислов титана обеспечивает высокую электропроводность их в твердом состоянии, что важно в начале процесса, при возбуждении дуги для создания начального объема шлаковой ванны. Лучшим с технологической точки зрения является флюс АН-8. При механизированной сварке меди и ее сплавов успешно используют обычные марки флюсов (ОСЦ-45, АН-348-А, АН-20, АН-26), т. е. флюсов, широко применяемых для сварки сталей. Для сварки алюминия и его сплавов по слою флюса разработаны две основные марки бескислородных флюсов: АН-А1 и АН-А4. Для электрошлаковой сварки алюминия также разработаны специальные флюсы. При сварке титана используют бескислородные флюсы типа АН-Т1, АН-Т3 и др., в состав которых в основном входят фтористые и хлористые соединения. Фтористые соединения могут реагировать с окислами титана и растворять их. Для обеспечения необходимых технологических свойств флюса в них вводят хлористые соединения.

2.7. ЗАЩИТНЫЕ ГАЗЫ

Защитные газы широко применяют для защиты электрода и расплавленного металла сварочной ванны и околошовной зоны при сварке плавящимся и неплавящимся электродом.

Защитные газы делятся на две группы: химически инертные и активные. Инертные газы не взаимодействуют с расплавленными металлами и практически не растворяются в них. Активные газы защищают зону сварки от воздуха, но при этом вступают в химическое взаимодействие с жидким металлом и могут растворяться в нем.

К химически инертным газам, используемым при сварке, относятся аргон и гелий.

Аргон — бесцветный, нетоксичный и невзрывоопасный газ, без запаха и вкуса. Аргон почти в 1,5 раза тяжелее воздуха и может накапливаться в слабо проветриваемых помещениях у пола, в приямках, где может вызвать кислородную недостаточность и удушье. Газообразный и жидкий аргон для использования в качестве защитной среды при сварке, резке и плавке активных и редких металлов и сплавов на их основе, алюминия, алюминиевых и магниевых сплавов, нержавеющей хромоникелевых жаропрочных сплавов и легированных сталей различных марок, а также при рафинировании металлов в металлургии выпускают в соответствии с ГОСТ 10157-79 высшего и первого сорта. Аргон высшего сорта содержит объемную долю аргона не менее 99,992%, аргон первого сорта — не менее 99,987%. Газообразный аргон поставляется в стальных баллонах серого цвета с надписью и полосой зеленого цвета вместимостью 40 дм³ (40 литров) под давлением 15 + 0,5 МПа при температуре 20°C. В одном баллоне содержится 6 200 литров газа. При транспортировании и хранении наполненных баллонов при повышенных температурах давление газа в баллоне не должно превышать рабочее давление при 20°C более, чем на 10%. Жидкий аргон поставляют в специальных транспортных цистернах.

Гелий — бесцветный, нетоксичный и невзрывоопасный газ, без запаха, значительно легче воздуха и аргона. Гелий для сварки поставляется по ТУ 51-689-75 трех сортов: марки А с объемной долей гелия 99,995%, марки Б с объемной долей гелия 99,99% и марки В с объемной долей гелия 99,99% в стальных баллонах при давлении 15 МПа или в сжиженном состоянии при давлении до 0,2 МПа. В баллоне вместимостью 40 л, окрашенном в коричневый цвет с белой надписью, содержится 6000 л газа. Стоимость гелия значительно выше стоимости аргона, поэтому его применяют в особых случаях при сварке химически чистых и активных металлов и сплавов. При сварке в гелии получается большая глубина проплавления (благодаря высокому значению потенциала ионизации) и особая форма шва.

К химически активным газам относят: двуокись углерода и смеси газов, содержащие двуокись углерода, кислород, инертные газы и др.

Углекислый газ, или двуокись углерода, — бесцветный газ, имеющий слабый кисловатый запах и вкус, хорошо растворяется в воде, придавая ей кислый вкус, нетоксичен, невзрывоопасен. Однако при концентрации более 5% (92 г/м³) может вызвать кислородную недостаточность и удушье. Углекислый газ тяжелее воздуха в 1,5 раза и может накапливаться в слабо проветриваемых помещениях у пола и в приямках. Поэтому помещения, где проводится сварка с использованием двуокиси углерода, должны быть оборудованы общеобменной приточно-вытяжной вентиляцией. Двуокись углерода может находиться в газообразном, сжиженном и твердом (в виде сухого льда) состояниях. Для

сварки используется двуокись углерода высшего сорта, содержащая не менее 99,8% объемной доли CO_2 , и первого сорта, содержащая не менее 99,5% CO_2 по ГОСТ 8050-85. Двуокись углерода поставляется в баллонах вместимостью 40 л, окрашенных в черный цвет с желтой надписью или в специальных емкостях. В стандартный баллон вместимостью 40 л заливают 25 кг жидкой двуокиси углерода под давлением около 0,6 МПа (при давлении около 0,6 МПа диоксид углерода при комнатной температуре превращается в жидкость), при испарении которой получается около 12 600 л углекислого газа.

Значительное влияние при сварке плавящимся электродом на характер переноса электродного металла, производительность расплавления электрода, разбрызгивание и форму проплавления оказывает состав защитного газа, в котором горит дуга. Поэтому широко применяют при сварке смеси газов различного состава. Улучшает перенос электродного металла и позволяет получать более плавную наружную поверхность шва применение смеси углекислого газа с 2–15% кислорода. Двойная смесь, состоящая из 80% аргона и 20% углекислого газа, позволяет реализовать мелкокапельный и струйный перенос электродного металла. Добавки углекислого газа и кислорода в аргон в различных количествах при сварке разных сталей и сплавов позволяют осуществлять управляемый перенос электродного металла при импульсно-дуговой сварке. Применение многокомпонентных смесей, состоящих из аргона, углекислого газа, окиси азота, водорода и др. газов позволяет осуществлять сварку вращающейся дугой и увеличить производительность расплавления и наплавки более чем в 2 раза при благоприятной форме проплавления и наружной поверхности шва.

ГЛАВА 3 СУЩНОСТЬ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

3.1. РУЧНАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА

Ручная дуговая сварка — дуговая сварка, при которой возбуждение дуги, подача электрода и его перемещение производятся вручную. В процессе сварки электрод перемещают по направлению к изделию по мере плавления электрода, вдоль соединяемых кромок и поперек соединения (поперечные колебания) для получения необходимых формы и сечения шва.

Это наиболее универсальный способ, который позволяет без замены сварочного инструмента и оборудования (при правильно выбранном сварочном режиме) выполнять швы различных типов в любом пространственном положении в цеховых и монтажных условиях. Покрытыми электродами сваривают черные и цветные металлы и различные сплавы и выполняют наплавку слоев с особыми свойствами. Для возбуждения и стабильного горения дуги используют специальные источники постоянного или переменного тока с крутопадающей внешней вольт-амперной характеристикой.

3.1.1. СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА

Возбуждение (зажигание) дуги происходит при кратковременном замыкании электрической сварочной цепи между изделием и концом электрода и быстром отводе электрода на расстояние 2...4 мм, в результате чего в парогазовом промежутке возникает дуговой разряд (рис. 3.1). Теплота, выделяющаяся в дуговом разряде, обеспечивает плавление стержня и покрытия электрода и металла соединяемых деталей.

При плавлении стержня капли жидкого электродного металла проходят через дуговой промежуток. Перенос электродного металла происходит в большинстве случаев без коротких замыканий. Размер капель и частота переноса определяются параметрами режима. С ростом сварочного тока диаметр капель уменьшается, а частота переноса увеличивается. С повышением напряжения на дуге диаметр капель увеличивается. При этом снижается частота переноса и растет время пребывания капель на торце электрода, где возможно их взаимодействие с атмосферой, что обуславливает повышенное выгорание легирующих элементов.

Расплавляющееся покрытие образует шлак и газы. Шлак обволакивает капли электродного металла, но не полностью предохраняет металл от

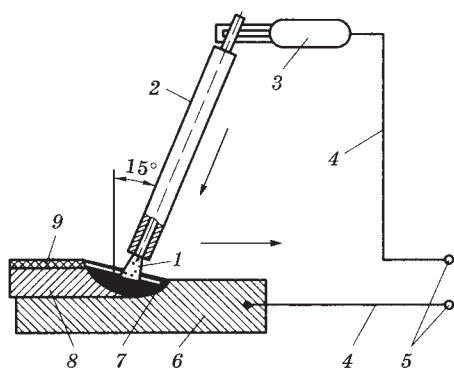


Рис. 3.1

Схема ручной дуговой сварки покрытым электродом:

1 — сварочная дуга; 2 — электрод; 3 — электрододержатель; 4 — сварочные провода; 5 — источник питания; 6 — свариваемая деталь; 7 — сварочная ванна; 8 — сварной шов; 9 — шлаковая корка; стрелки показывают направление движения электрода в процессе сварки.

взаимодействия с атмосферой, поэтому необходима и газовая защита. С этой целью в электродные покрытия вводят газообразующие компоненты.

Основной и электродный металлы расплавляются, образуя сварочную ванну. Размеры сварочной ванны зависят от режима сварки и обычно не превышают следующих значений: по глубине проплавления — 7 мм, по ширине — 15 мм и по длине — 30 мм. Шлак с каплями электродного металла попадает в сварочную ванну и всплывает на ее поверхность. По мере удаления дуги расплавленный металл сварочной ванны охлаждается и затвердевает, образуя сварной шов. Жидкий шлак, покрывающий ванну, также затвердевает и на поверхности шва появляется твердая шлаковая корка, удаляемая после сварки.

Таким образом, покрытие электрода обеспечивает газошлаковую защиту металла сварного соединения от взаимодействия с воздухом и металлургическую обработку металла в ванне.

Основными преимуществами способа являются универсальность и простота оборудования. Недостаток — невысокая производительность и применение ручного труда. Невысокая производительность обусловлена малыми допустимыми значениями плотности тока, а также тем, что металл шва формируется в основном за счет электродного металла.

Ограничение плотности тока вызвано низкой допустимой температурой нагрева электрода проходящим сварочным током, которая для покрытий с большим содержанием органических веществ не превышает 200°C , а для покрытий основного типа — не более 700°C . При большой силе тока наблюдается перегрев электрода. В результате ухудшаются защитные свойства покрытия, наблюдается его осыпание со стержня, нарушается стабильность плавления электрода.

Формирование шва в основном за счет электродного металла объясняется невысокой глубиной проплавления при сварке. Доля участия основного металла в формировании шва обычно не более 35%. В этих условиях определяющим в производительности процесса становится коэффициент наплавки, значение которого зависит от физико-химических свойств покрытия, рода тока и его полярности, состава электрода, режима сварки и изменяется обычно в пределах 8...12 г/А·ч.

При расчете количества электродов, расходуемых на сварку данного шва, исходят из коэффициента расплавления электрода, который больше коэффициента наплавки на количество электродного металла, теряемого на разбрызгивание и испарение и определяемого коэффициентом потерь. Величина коэффициента потерь изменяется в пределах от 5 до 15% в зависимости от плотности тока

в электроде, состава покрытия и режима сварки. Если учесть, что при сварке покрытыми электродами до 15% длины стержня электрода теряется в виде неиспользуемых отходов (огарков), то общие потери электродного металла на угар, разбрызгивание и огарки могут быть до 30%.

3.1.2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМОВ ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Под режимом сварки понимают совокупность контролируемых параметров, при которой обеспечивается устойчивое горение дуги и получение швов заданных размеров, формы и свойств. Параметры режима подразделяют на основные и дополнительные. К основным параметрам относят диаметр электрода, силу сварочного тока, род и полярность его, напряжение дуги. К дополнительным параметрам — наклон и поперечные колебания электрода, положение шва в пространстве, число проходов.

Диаметр электродов выбирают в зависимости от толщины металла, катета шва, положения шва в пространстве. Примерное соотношение между толщиной металла S и диаметром электрода d при сварке шва в нижнем положении следующее:

S , мм	1...2	3...5	4...10	12...24	30...60
d , мм	2...3	3...4	4...5	5...6	6 и более

Выполнение вертикальных, горизонтальных и потолочных швов независимо от толщины свариваемого металла производится электродами небольшого диаметра (до 4 мм), так как при этом меньше стекание жидкого металла и шлака из сварочной ванны. При сварке многослойных швов для лучшего провара корня шва первый шов сваривают электродом диаметром 3...4 мм, а последующие — электродами большего диаметра.

Сила сварочного тока обычно устанавливается в зависимости от выбранного диаметра электрода. При сварке швов в нижнем положении величину тока подсчитывают, пользуясь эмпирическими формулами:

$$I_{\text{св}} = Kd \text{ или } I_{\text{св}} = (20 + 6d)d,$$

где d — диаметр электрода, мм; K — коэффициент, зависящий от диаметра электрода и имеющий следующие значения:

d , мм	2	3	4	5	6
K	25...30	30...45	35...50	40...45	45...60

При сварке на вертикальной плоскости силу тока уменьшают на 10...15%, а в потолочном положении — на 15...20% против значения, выбранного для нижнего положения.

Род тока и полярность устанавливают в зависимости от вида электродного покрытия, состава свариваемого металла и его толщины. При сварке постоянным током обратной полярности на электроде выделяется больше теплоты. Поэтому обратная полярность применяется при сварке тонких деталей с целью

предотвращения прожога, при сварке легированных сталей во избежание их перегрева и при сварке электродами с основным покрытием, когда требуется повышенное выделение теплоты на электроде для плавления тугоплавких компонентов покрытия. Переменный ток можно использовать при сварке углеродистых сталей электродами с кислыми, рутиловыми и целлюлозными покрытиями.

Напряжение дуги при ручной дуговой сварке устанавливается в пределах 20...36 В и регламентируется производителем электродов. Число проходов определяют, учитывая, что площадь поперечного сечения металла, наплавляемого за один проход, при которой обеспечиваются оптимальные условия формирования, должна составлять: для первого прохода (при сварке корня шва $F_1 = (6...8) d$); для последующих проходов $F_n = (6...8) d$, но не более 40 мм².

3.1.3. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ СОЕДИНЕНИЙ И ШВОВ

Подготовка и сборка сварных соединений. Основные типы, конструктивные элементы и размеры сварных соединений из сталей, а также сплавов на железоникелевой и никелевой основах, выполняемых ручной дуговой сваркой, установлены ГОСТ 5264-80. В нем предусмотрено четыре типа соединений в зависимости от толщины свариваемых деталей.

По форме подготовленных кромок соединения бывают с отбортовкой кромок, без скоса кромок и со скосом кромок — одной или двух. Выполнять швы можно как с одной стороны соединений (односторонние), так и с двух сторон (двусторонние).

При расположении свариваемых деталей под углом основные типы, конструктивные элементы и размеры швов сварных соединений установлены ГОСТ 11534-75, которым предусмотрены формы подготовки кромок и размеры выполнения швов угловых и тавровых соединений.

От состояния поверхности свариваемых кромок в значительной мере зависит качество сварных швов. Подготовка кромок под сварку состоит в тщательной очистке их от ржавчины, окалины, грязи, масла и других инородных покрытий. Кромки очищают стальными вращающимися щетками, гидропескоструйным и дробеметным способами, шлифовальными кругами, пламенем сварочной горелки, травлением в растворах кислот и щелочей.

Подготовленные детали собирают под сварку. При сборке важно выдерживать необходимые зазоры и совмещение кромок. Точность сборки проверяют шаблонами, измерительными линейками и различного рода щупами. Сборку выполняют в специальных приспособлениях или на выверенных стеллажах. Временное закрепление деталей производят струбцинами, скобами или прихваткой короткими швами. Количество прихваток и их размер определяются технологической документацией.

Общие технические приемы при сварке. Технология ручной дуговой сварки предусматривает выполнение следующих операций: возбуждение дуги, перемещение электрода в процессе сварки, выполнение швов в определенном порядке в зависимости от особенностей сварных соединений и заварка кратера.

Для образования заданных размеров сварного шва и требуемой формы проплавления электроду придается сложное движение в трех направлениях.

Первое движение — это движение электрода в направлении оси со скоростью его плавления для поддержания определенной длины дуги, которая зависит от марки и диаметра электрода и ориентировочно должна быть в пределах

$$L_d = (0,5 \dots 1,1) d,$$

где L_d — длина дуги, мм; d — диаметр электрода, мм.

Длинная дуга способствует более интенсивному окислению и азотированию расплавленного металла, что приводит к пористости металла шва, и увеличивает разбрызгивание.

Второе движение электрода направлено вдоль оси шва и производится со скоростью сварки.

В результате этих двух движений образуется узкий шов шириной не более 1,5 диаметра электрода. Такими швами сваривают тонкий металл, а также корень шва при многослойной (многопроходной) сварке.

Третье движение — это колебание конца электрода поперек оси шва, которое необходимо для образования валика определенной ширины, хорошего провара кромок и замедления остывания сварочной ванны. Колебательные движения электрода поперек оси шва (рис. 3.2) могут быть различными — в зависимости от формы, размеров и положения шва в пространстве. При сварке с поперечными колебаниями ширина валика может составлять $(2 \dots 4)d$, а форма проплавления зависит от траектории движения и изменяется в поперечном сечении шва в соответствии с количеством теплоты, вводимой в основной металл, обратно пропорциональным скорости перемещения конца электрода.

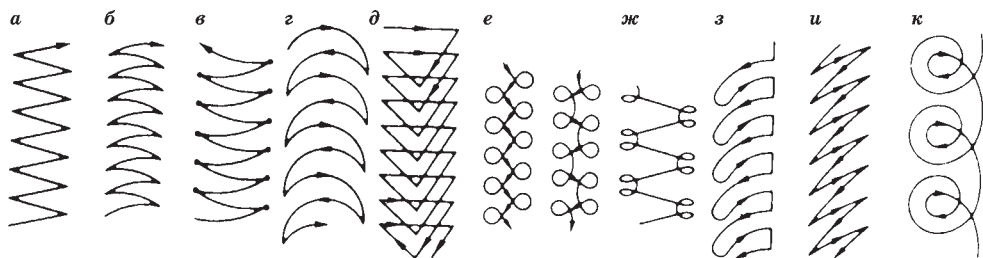


Рис. 3.2

Колебательные движения электрода при ручной дуговой сварке:

а, б — при обычной сварке; в–ж — с усиленным прогревом кромок; з, и — с усиленным прогревом одной кромки; к — с прогревом корня шва.

Заканчивают сварку заваркой кратера, который образуется в шве при обрыве дуги и является местом скопления неметаллических включений и зарождения трещин. Для этого электрод держат неподвижно до естественного обрыва дуги или укорачивают дугу вплоть до частых коротких замыканий, после чего ее резко обрывают. При перерывах в процессе сварки, например при смене электрода, следует переплавить застывший металл кратера и только после этого продолжить процесс.

3.1.4. ТЕХНИКА ВЫПОЛНЕНИЯ СТЫКОВЫХ И УГЛОВЫХ ШВОВ

Стыковые соединения без скоса кромок, со скосом одной или двух кромок сваривают однослойными или многослойными (многопроходными) швами с одной стороны или с двух сторон стыка. Сварку выполняют на весу, на остающейся стальной подкладке или с предварительной подваркой корня шва (рис. 3.3). Первый слой и подварку корня шва выполняют электродом диаметром 3...4 мм.

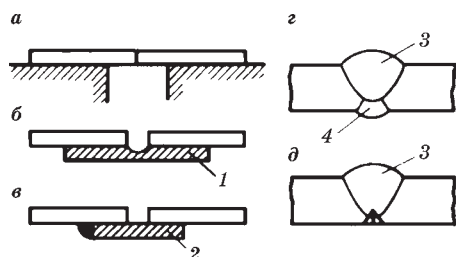


Рис. 3.3
Схемы сборки и сварки стыковых соединений:

a — на весу; *б* — на медной съемной подкладке; *в* — на остающейся стальной подкладке; *г* — с предварительным подварочным швом; *д* — удаление непровара в корне шва для последующей подварки; 1, 2 — медная и стальная подкладки; 3, 4 — основной и подварочный швы.

В ответственных конструкциях при односторонней сварке на весу корень шва удаляют механической обработкой или газовой поверхностной строжкой, а затем накладывают подварочный шов.

Угловые швы применяют при сварке угловых, тавровых и нахлесточных соединений. Сварка угловых швов в нижнем положении может производиться вертикальным электродом «в лодочку» или наклонным электродом (рис. 3.4).

Сварка угловых швов «в лодочку» обеспечивает требуемое формирование

шва и хороший провар корня и стенок без опасности образования подрезов, а также имеется возможность выполнять за один проход швы большого сечения. Однако при катете более 12 мм рекомендуют применять многослойные швы и собирать детали с минимальным зазором для предупреждения вытекания металла сварочной ванны.

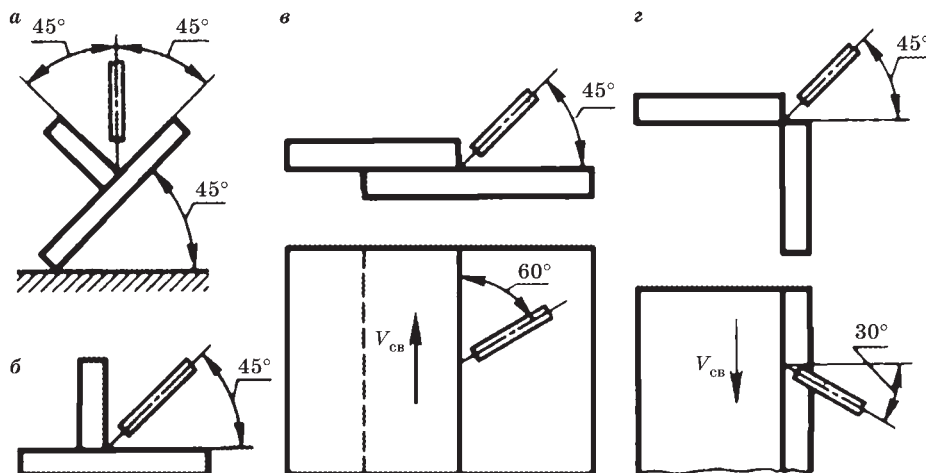


Рис. 3.4
Схемы выполнения угловых швов:

a — «в лодочку»; *б-г* — наклонным электродом в угол.

При сварке угловых швов наклонным электродом, возможно образование подрезов на вертикальной полке, а также неполное проплавление корня шва или кромки горизонтальной детали, поэтому при катете более 8 мм сварку ведут многопроходным швом (рис. 3.5). Для лучшего провара корня шва первый слой выполняют узким швом электродом диаметром 3...4 мм без колебательных движений.

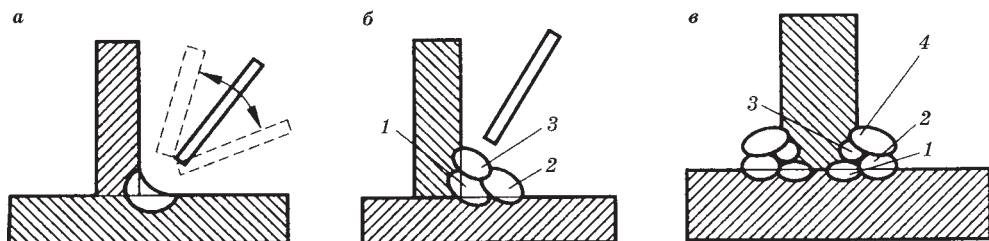


Рис. 3.5
Сварка в угол одно- (а) и многопроходных (б, в) угловых швов:
1-4 — последовательность выполнения проходов.

3.1.5. ТЕХНИКА СВАРКИ МЕТАЛЛА РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ

При сварке листов толщиной 0,5...3 мм возможно сквозное проплавление металла (прожог), поэтому применяют малые токи, отбортовку кромок, теплоотводящие или остающиеся подкладки.

Сварку с отбортовкой кромок выполняют на постоянном токе, часто на спуск в полувертикальном положении ($45...65^\circ$).

При использовании временных теплоотводящих подкладок (массивных медных и бронзовых плит или брусков) сборку осуществляют без зазора, обеспечивая плотное прилегание свариваемых листов к подкладке.

Остающиеся подкладки применяют при сварке встык. Сварку ведут с проплавлением элементов из тонколистового металла и приваркой их к подкладке.

С увеличением толщины металла в сварных соединениях возрастают объемные сварочные напряжения, которые создают опасность возникновения и развития в швах трещин, поэтому сварку толстолистовых конструкций ведут различными способами (рис. 3.6).

Металл толщиной 15...20 мм сваривают способом двойного слоя. На участке I (рис. 3.6а) длиной 250...300 мм, наплавляют первый слой шва, счищают с него шлак и по горячему металлу первого слоя (не ниже $150...200^\circ\text{C}$) накладывают второй слой.

Металл толщиной 20...25 мм и более сваривают блоками или каскадом. Сварку блоками (рис. 3.6б) выполняют отдельными участками, а промежутки между ними заполняют до того, как будет завершена сварка всего шва. При сварке каскадом (рис. 3.6в) каждый последующий участок многослойного шва перекрывает весь предыдущий участок или его часть. При V-образной подготовке кромок длина участка — 300...400 мм, а при X-образной подготовке — 500...800 мм.

Металл толщиной 30 мм и более часто сваривают одновременно два сварщика, находящихся с противоположных сторон соединения.

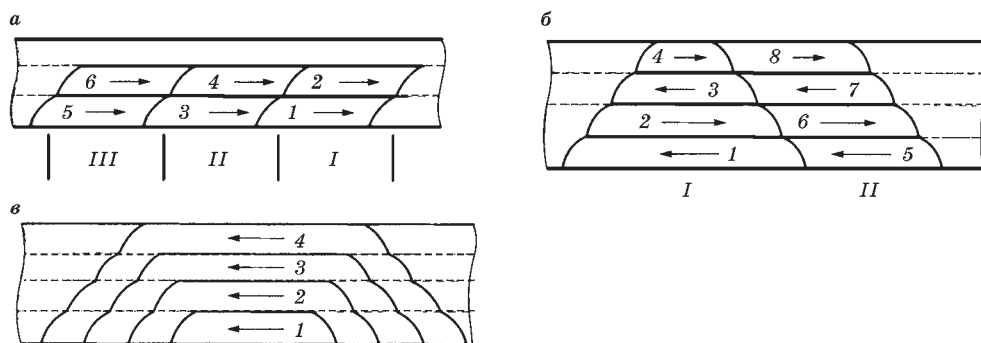


Рис. 3.6
Сварка металла большой толщины:

а — двойным слоем; *б* — блоками; *в* — каскадом; *I–III* — участки; *1–8* — последовательность сварки слоев.

Сварка швов различной протяженности. В зависимости от длины швы разделяют на короткие (300...350 мм), средние (350...1000 мм) и длинные (свыше 1000 мм).

Короткие швы сваривают от одного конца шва к другому (напроход); швы средней длины — от середины соединения к концам; длинные швы — обратноступенчатым способом, при котором сварной шов выполняется следующими один за другим участками в направлении, обратном приращению шва (рис. 3.7). Длина ступени (участка) — 100...350 мм, причем ступени более длинные при сварке толстого металла. При выполнении многослойных швов также используется обратноступенчатый способ, при этом смежные участки вышележащих слоев сваривают в направлении, обратном сварке нижележащих швов. Концы швов смежных участков должны быть смещены на 25...30 мм.

Особенности сварки в различных пространственных положениях. В зависимости от положения в пространстве существенно изменяются условия формирования шва, поэтому для получения заданной формы шва необходимо назначать соответствующие режим и технику сварки (табл. 3.1).

Таблица 3.1

**Режимы ручной дуговой сварки стыковых соединений
(в нижнем положении) листовой стали**

Толщина листа, мм	Диаметр электрода, мм	Сила сварочного тока, А	Толщина листа, мм	Диаметр электрода, мм	Сила сварочного тока, А
1...4	1,5	25...40	6...12	4	160...200
	2,0	60...70		5	220...280
3	3,0	100...140	13 и более	5	220...280
4...5	3,0	100...140		6	280...340
	4,0	160...200		7	350...400

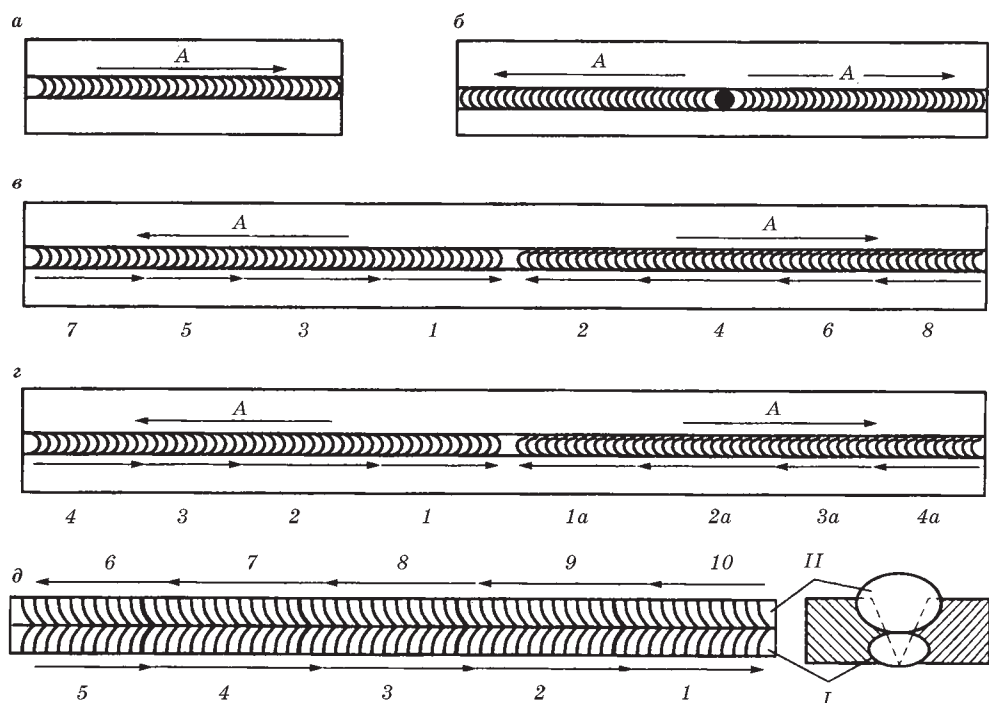


Рис. 3.7
Способы выполнения швов по длине:

а — сварка «на проход»; *б* — от середины к краям; *в-г* — сварка длинных швов обратноступенчатым способом; 1–10 — порядок и направление сварки участков шва; *A* — общее направление сварки; *I, II* — слои шва.

Нижнее положение является наиболее удобным для сварки, так как капли электродного металла легко переходят в сварочную ванну под действием собственного веса, и жидкий металл не вытекает из нее. Кроме того, наблюдение за сваркой в нижнем положении более удобно. В процессе сварки электрод наклоняют по направлению сварки на угол $10-20^\circ$ (рис. 3.8*а, б*).

В вертикальном положении расплавленный металл сварочной ванны стремится стечь вниз, поэтому вертикальные швы выполняют короткой дугой при переносе электродного металла с короткими замыканиями дугового промежутка. Вертикальные швы выполняют как снизу вверх, так и сверху вниз (рис. 3.8*в*).

В первом случае застывший металл шва удерживает сварочную ванну. Для полного предотвращения вытекания жидкого металла ванны осуществляют поперечные движения электродом, которые позволяют управлять тепловым потоком и получать валик увеличенной ширины, равной 2–3 диаметрам электрода, что обеспечивает быстрое затвердевание жидкого металла.

Сварку сверху вниз применяют при малой толщине металла или при выполнении первого слоя многослойного шва. В этом случае подтекающий под дугу жидкий металл уменьшает возможность образования сквозных прожогов. Для улучшения условий формирования шва амплитуда колебаний электрода должна быть небольшой, а дуга очень короткой.

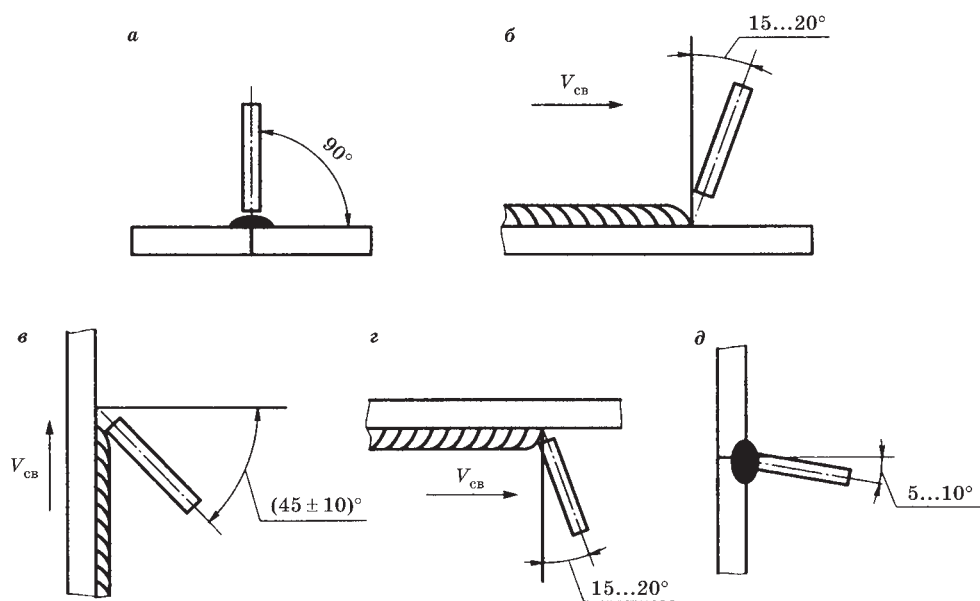


Рис. 3.8

Положение электрода при сварке швов:

а, б — в нижнем; *в* — вертикальном (снизу вверх); *г* — потолочном; *д* — горизонтальном положениях.

В горизонтальном положении для предупреждения стекания жидкого металла ванны скос кромок стыковых соединений делают на одной верхней детали (рис. 3.8*д*). В нахлесточных соединениях удержанию расплавленного металла способствует горизонтальная кромка нижнего листа. Колебательные движения электродом совершают по спирали.

В потолочном положении (рис. 3.8*г*) сила тяжести препятствует переносу электродного металла и вызывает стекание расплавленного металла, поэтому объем сварочной ванны должен быть небольшим. Это достигают применением электродов малого диаметра (3...4 мм) и небольших сварочных токов. Основным условием получения качественного шва является поддержание короткой дуги путем периодических замыканий электрода с ванной жидкого металла. Одновременно электроду сообщают поперечные колебательные движения.

3.1.6. ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РУЧНОЙ СВАРКИ

Существует три основных направления повышения производительности: во-первых, за счет увеличения коэффициента наплавки, во-вторых, за счет большей доли участия основного металла в формировании шва и, в-третьих, при использовании специальных методов сварки покрытыми электродами.

Введение в состав покрытия железного порошка приводит к повышению коэффициента наплавки до 18 г/А·ч. В этом случае в образовании шва принимает участие не только металл электродного стержня, но и металл, вводимый

в состав покрытия. Например, при увеличении в рутиловом покрытии электродов содержания железного порошка с 20% до 50...60% производительность сварки в нижнем положении возрастает примерно в 1,5...2 раза.

Сварка с глубоким проплавлением позволяет увеличивать долю участия основного металла в металле шва, чем и обеспечивается повышение производительности. При этом способе сварку ведут, опираясь покрытием электрода на кромки свариваемого металла. Используют электроды с повышенной толщиной покрытия при массе покрытия 60...80% массы стержня и отношении диаметра электрода к диаметру стержня 1,5...1,6. Таким способом удается выполнять одностороннюю сварку встык без разделки кромок стальных листов толщиной 8...10 мм и двустороннюю сварку листов толщиной 16...18 мм.

Сварка наклонным электродом (рис. 3.9а) позволяет повысить производительность труда в 2,5...3 раза за счет одновременного обслуживания одним сварщиком до 3...4 постов. При этом способе используют приспособление, состоящее из штанги, электрически изолированной от свариваемого металла, и обоймы, к которой подводят ток от источника питания сварочной дуги. Для фиксирования штанги на изделии используют трубки или постоянные магниты. Плавящийся покрытый электрод устанавливают наклонно, опирают на изделие и закрепляют в обойме, которая во время плавления электрода скользит под действием силы тяжести по штанге, при этом дуга перемещается вдоль свариваемых кромок, образуя шов. Этим способом можно выполнять стыковые и угловые швы.

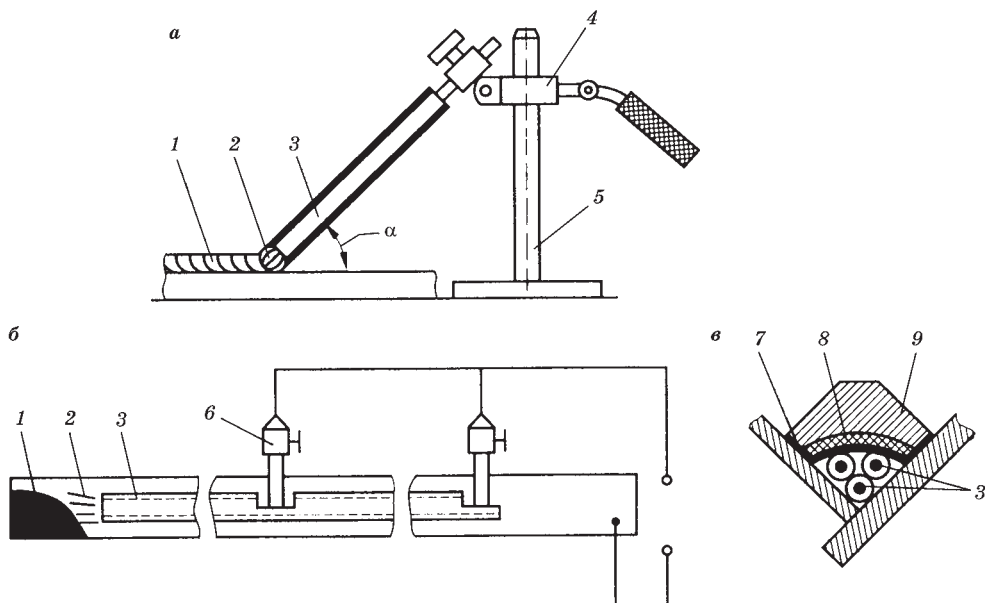


Рис. 3.9

Схемы сварки наклонным (а) и лежачим (б, в) электродами:

1 — шов; 2 — дуга; 3 — электрод; 4 — обойма; 5 — штанга; 6 — контакт; 7 — бумага; 8 — слой меди; 9 — стальная накладка; α — угол наклона электрода.

Для сварки используют специальные электроды, которые при диаметрах 4...8 мм имеют длину 450...1000 мм, а при диаметрах 6...10 мм — длину 700...1200 мм. Сварочный ток подбирают из расчета

$$I_{\text{св}} = (40...45)d, \text{ А.}$$

Сварка лежачим электродом также позволяет обслуживать одновременно несколько постов. При этом способе специальный покрытый плавящийся электрод укладывают вдоль свариваемых кромок (рис. 3.9б, в). При диаметрах электродов 4 и 8 мм толщина покрытия составляет соответственно 1,5 и 3 мм, а длина электродов — 700 и 900 мм.

Многослойную сварку выполняют, укладывая три или более электродов в разделку кромок стыка или в угол таврового соединения при положении «в лодочку». Ток к электродам подается от нескольких источников.

3.2. СВАРКА ПОД ФЛЮСОМ

Дуговая сварка под флюсом — это дуговая сварка, при которой дуга горит под слоем сварочного флюса. Процесс отличается от других видов сварки наибольшей производительностью, высоким уровнем механизации сварочных работ и лучшими гигиеническими условиями труда. Экономичность процесса определяется снижением расхода сварочных материалов за счет сокращения потерь металла на угар, разбрызгивание (не более 3%) и лучшего использования тепла дуги.

Сварку под флюсом применяют для изготовления машиностроительных изделий, крупногабаритных резервуаров, строительных конструкций и труб из сталей, никелевых сплавов, меди, алюминия, титана и их сплавов.

3.2.1. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ

Сущность сварки под флюсом. При этом способе сварки электрическая дуга горит под слоем сварочного флюса между электродной (сварочной) проволокой и свариваемым металлом (рис 3.10). Флюс засыпают впереди дуги из бункера слоем толщиной 40...80 и шириной 40...100 мм. Ролики специального механизма подают электродную проволоку в дугу. Дуга перемещается в направлении сварки с помощью специального механизма (автоматическая сварка) или вручную (механизированная сварка). Сварочный ток, переменный или постоянный, прямой или обратной полярности, подводится от источника к электродной проволоке и изделию.

Сварочная дуга горит в газовом пузыре, образованном в результате плавления флюса и металла и заполненном парами металла, флюса и газами. Перенос электродного металла осуществляется каплями, размер которых уменьшается с ростом тока и увеличивается с повышением напряжения, и мало влияет на потери на угар и разбрызгивание. Жидкая пленка флюса изолирует от воздуха зону сварки, а затвердевший флюс образует на поверхности шва шлаковую корку, которая затем отделяется от поверхности шва. Масса флюса, идущего на шлаковую корку, обычно равна массе расплавленной сварочной проволоки.

Роль флюса при сварке. Флюс влияет на устойчивость дуги, формирование и химический состав металла шва, стойкость швов против образования пор и кристаллизационных трещин.

Устойчивость дуги повышает наличие во флюсе оксидов щелочных и щелочноземельных металлов, которые увеличивают электрическую проводимость и длину дугового промежутка. Соединения фтора, напротив, снижают эти показатели. Таким образом, в зависимости от химического состава флюсы обладают разными стабилизирующими свойствами.

Форма шва определяется стабилизирующими свойствами флюса, его насыпной массой и гранулометрическим составом. Флюс с плохими стабилизирующими свойствами, укорачивая дугу, приводит к формированию узких швов с большой глубиной проплавления и высоким усилением. Флюс с хорошими стабилизирующими свойствами позволяет удлинить дугу, получить широкие швы с малым проплавлением и небольшой высотой усиления.

Насыпная масса флюса пемзовидных плавных флюсов ($0,7...0,9 \text{ г/см}^3$) меньше стекловидных (насыпная масса $1,4...1,7 \text{ г/см}^3$) одинакового химического состава, поэтому на плавление пемзовидного флюса требуется вдвое меньше энергии и ширина швов больше.

Гранулометрический состав флюса (размер его зерен) также влияет на форму шва. Под мелким флюсом швы получаются более узкие, с большей глубиной проплавления и с большей высотой усиления, чем при использовании крупнозернистого флюса.

Химический состав металла шва определяется взаимодействием между жидким шлаком и металлом. Длительность этого взаимодействия обычно очень невелика и при дуговой сварке может колебаться от нескольких секунд до 1 минуты. Взаимодействие прекращается после затвердевания металла и шлака. Несмотря на кратковременность реакции, взаимодействие между шлаком и металлом при дуговой сварке, как правило, проходит очень энергично, что обусловлено высокими температурами расплавленных металла и шлака, значительными поверхностями их контакта и относительно большим количеством шлака (в среднем $30...40\%$ массы металла).

Наиболее важную роль при сварке под плавными флюсами играют реакции восстановления марганца и кремния. Переход марганца в шов тем значительнее, чем больше MnO и меньше SiO_2 содержится в сварочном флюсе (шлаке). Чем более кислый флюс, тем переход марганца меньше. Переход кремния из сварочного шлака в металл пропорционален концентрации SiO_2 в шлаке

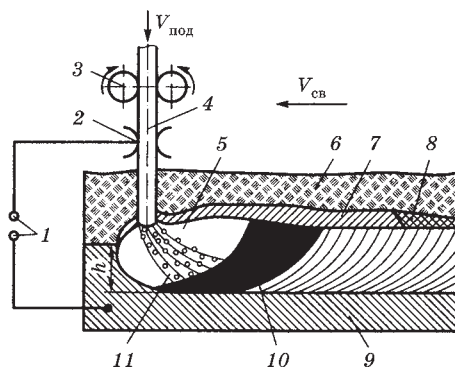


Рис. 3.10

Схема дуговой сварки под флюсом:

1 — источник тока; 2 — скользящий контакт (токоподвод); 3 — подающий ролик; 4 — электродная проволока; 5 — парогазовый пузырь; 6 — флюс; 7 — расплавленный флюс; 8 — затвердевший шлак; 9 — свариваемый (основной) металл; 10 — сварочная ванна; 11 — сварочная дуга; $V_{св}, V_{под}$ — скорость сварки и подачи электродной проволоки; h — глубина проплавления основного металла.

и обычно невелик (0,1...0,2%). Увеличение основности флюса снижает переход кремния из шлака в металл.

Поры в швах появляются при повышенной влажности флюса и недостаточной защите зоны сварки от воздуха (малый слой флюса, большие зазоры между свариваемыми кромками) за счет растворения водорода и образования CO_2 . Компоненты флюса CaF_2 и SiO_2 способствуют образованию HF , нерастворимого в жидком металле, поэтому содержание водорода в металле шва и вероятность образования пор уменьшаются. Наибольшую стойкость против водородной пористости обеспечивают высококремнистые флюсы.

Чем более развита поверхность зерен флюса, тем больше выделяется газообразных фторидов и тем интенсивней связывается водород в сварочной ванне в нерастворимые соединения. Максимально развитую поверхность имеют пемзовидные флюсы, поэтому они наиболее эффективны против образования пор.

Стойкость швов против образования трещин при сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей обеспечивают высококремнистые флюсы с высоким содержанием оксидов марганца (35...40%). Увеличение содержания марганца в металле сварочной ванны и введение в нее алюминия и титана повышает стойкость швов против образования кристаллизационных трещин, уменьшая вредное влияние серы. Применение флюсов, окисляющих углерод в сварочной ванне, также способствует увеличению стойкости швов против трещин.

Электродные материалы. В промышленности преимущественное применение находит способ сварки под флюсом сварочной проволокой диаметром от 2 до 5 мм. Однако в некоторых случаях сварку и особенно наплавку целесообразно выполнять ленточными электродами. Лента, применяемая для этих электродов, имеет толщину до 2 мм и ширину до 40 мм. Изменяя форму ленты, можно изменить и форму поперечного сечения шва, достигая повышенной глубины проплавления по его оси или получая более равномерную глубину проплавления по всему сечению шва.

Производительность процесса сварки под флюсом. По сравнению с ручной дуговой сваркой производительность увеличивается в 5...12 раз. При сварке под флюсом ток по электродной проволоке проходит только в ее вылете (участке от токоподвода до дуги), длина которого обычно не превышает 70 мм. Поэтому нет ограничений по температуре нагрева проволоки и можно использовать повышенные (25...200 А/мм²) плотности сварочного тока. Появляется возможность сваривать металл повышенной толщины без разделки кромок или уменьшить угол разделки и, следовательно, количество электродного металла, необходимого для ее заполнения. Металл шва состоит на 70...80% из переплавленного основного металла. В результате скорость сварки может быть значительно увеличена. Соответственно, возрастает производительность процесса.

Качество сварного соединения. Высокое качество достигается за счет надежной защиты расплавленного металла от взаимодействия с воздухом, его металлургической обработки и легирования расплавленным шлаком. Наличие шлака на поверхности шва уменьшает скорость кристаллизации металла

сварочной ванны и скорость охлаждения сварного соединения. В результате металл шва не имеет пор, содержит пониженное количество неметаллических включений. Улучшение формы шва и стабильности его размеров, особенно глубины проплавления, обеспечивает постоянство химического состава и других свойств по всей длине шва.

Недостатки способа. Повышенная жидкотекучесть расплавленного металла и флюса делает возможной сварку только в нижнем положении при отклонении плоскости шва от горизонтальной не более чем на $10...15^\circ\text{C}$.

3.2.2. СПОСОБЫ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ

Наиболее часто сварку ведут одним электродом или одной дугой. Для расширения технологических возможностей и повышения производительности сварки можно использовать несколько одновременно горящих дуг.

Многоэлектродная сварка. В этом случае питание дуг сварочным током производится от одного источника. При сварке двумя электродами, если расстояние между ними менее 20 мм, образуется единая сварочная ванна. Электроды могут располагаться поперек или вдоль стыка кромок или занимать промежуточное положение (рис. 3.11а). Поперечное расположение электродов применяют для сварки отдельных слоев многослойных швов при увеличенных зазорах в стыке между кромками, а также наплавки. Последовательное расположение электродов позволяет увеличивать глубину проплавления (рис. 3.11б).

Многодуговая сварка. При этом способе каждый электрод присоединен к отдельному источнику постоянного, переменного тока, или дуги питаются разнородными токами. Образовавшиеся дуги могут гореть в одном газовом пузыре. Электроды располагаются перпендикулярно свариваемой поверхности

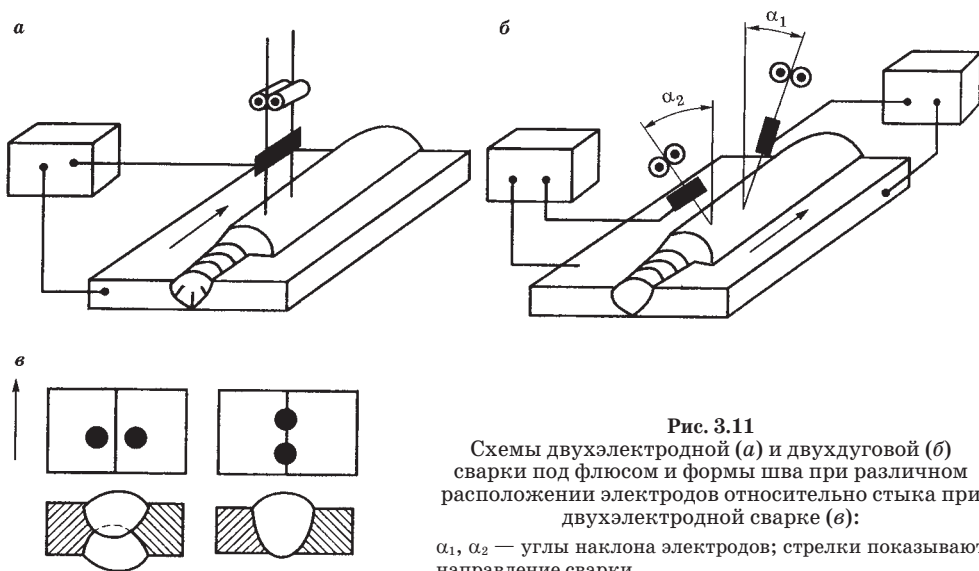


Рис. 3.11
Схемы двухэлектродной (а) и двухдуговой (б) сварки под флюсом и формы шва при различном расположении электродов относительно стыка при двухэлектродной сварке (в):
 α_1, α_2 — углы наклона электродов; стрелки показывают направление сварки.

или наклонно в плоскости, параллельной направлению сварки (рис. 3.11б). При отклонении первой дуги на угол α_1 растет глубина проплавления, а при отклонении второй дуги на угол α_2 увеличивается ширина шва, определяемая этой дугой. Это позволяет избежать подрезов по кромкам шва, резко повысить скорость сварки, а значит, и производительность процесса.

При увеличенном расстоянии между электродами дуги горят в отдельные сварочные ванны. Обычно в таком случае электроды располагаются перпендикулярно поверхности изделия. Сварка по этой схеме позволяет уменьшить вероятность появления закалочных структур в металле шва и околошовной зоны. Это объясняется тем, что первая дуга выполняет предварительный подогрев, который уменьшает скорость охлаждения металла шва и околошовной зоны после прохода второй дуги. Вторая дуга частично переплавляет первый шов и термически обрабатывает его. Изменяя сварочный ток каждой дуги и расстояние между ними, можно получать требуемый термический цикл сварки и таким образом регулировать свойства металла сварного соединения.

Сварка с дополнительной присадкой. Стыковые швы с разделкой кромок и угловые швы, где требуется большое количество наплавленного металла, иногда выполняют с подачей дополнительного порошкового присадочного металла (ППМ). ППМ предварительно засыпают в зазор между кромками или подают на вылет электрода с помощью специальных дозаторов. Это на 50...70% увеличивает количество наплавленного металла, повышает производительность сварки, позволяет вести сварку по увеличенным зазорам, снизить перегрев металла шва и уменьшить ширину зоны термического влияния.

3.2.3. ПОДГОТОВКА И СБОРКА ДЕТАЛЕЙ ПОД СВАРКУ

Основные типы соединений, конструктивные элементы и их размеры регламентируются двумя стандартами: ГОСТ 8713-79 и ГОСТ 11533-75.

Сборка деталей. Подготовка элементов к сварке под флюсом проводится любым механическим способом или методом термической резки (кислородной, плазменной). Очистка может производиться как механическими способами, так и газопламенной обработкой.

Сборку элементов со стыковыми швами проводят на стеллажах или специальных приспособлениях. Если свариваемые кромки имеют разную толщину, то должен быть сделан скос с одной или двух сторон листа большей толщины. Допустимые смещения (превышение) свариваемых кромок друг относительно друга приведены ниже.

Толщина листов, мм	до 4	4...10	более 10
Допустимые смещения кромок, мм	1	2	0,5S, но не более 3 мм

Зазор и взаимное расположение листов при сварке стыковых швов без разделки кромок фиксируется прихватками и технологическими планками. Длина прихваток 50...100 мм, расстояние между прихватками по длине стыка 500...550 мм, высота усиления прихватки 3...4 мм. Сварку следует начинать на входных, а заканчивать на выходных технологических планках (рис. 3.12а), которые после остывания шва удаляют.

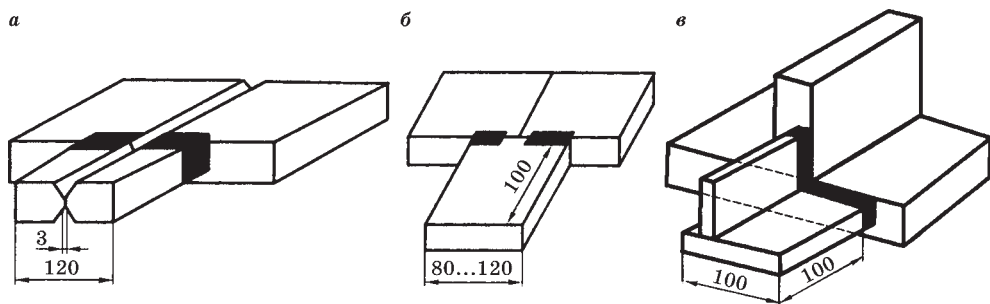


Рис. 3.12
Входные и выходные планки для стыковых швов с разделкой (а)
и без разделки (б) кромки и для углового шва (в)

При сборке стыковых соединений с разделкой кромок прихватки по длине стыка ставить не рекомендуется. Листы перед сваркой скрепляют концевыми планками (рис. 3.12б). Разделка кромок входных и выходных технологических планок должна быть такая же, как и кромок основного соединения. Длина выходной планки должна быть на 40...50 мм больше кратера основного шва, ширина обычно равна 80...120 мм.

Сборку тавровых соединений обычно выполняют в специальных кондукторах, либо на стеллажах по разметке. Перед сваркой элементы соединяют прихватками (длина прихваток 80...120 мм, катет < 5 мм, расстояние между прихватками 500...600 мм). Перед сваркой к детали приваривают концевые планки (рис. 3.12в) и при сварке «в лодочку», если зазор между элементами превышает 2 мм, выполняют подварочный шов со стороны, противоположной первому шву.

Формирующие приспособления. При сварке однопроходных стыковых швов с проплавлением металла на всю толщину или первого прохода многослойного шва может произойти вытекание сварочной ванны и образование прожога. Для предупреждения прожогов используют формирующие подкладки (съёмные из меди, остающиеся из стали, флюсовые подушки, керамические подкладки и гибкие формирующие ленты). Высокое качество шва обеспечивается при плотном поджатии подкладок. Зазор между подкладкой и кромками не должен превышать 1 мм. Если между подкладкой и изделием есть зазоры, то в шве образуются протечи и прожоги.

Сварка на медной подкладке, удаляемой после сварки, весьма распространена. Для провара корня шва и формирования обратного валика в подкладке делают канавку (рис. 3.13а, б). Для предупреждения проплавления подкладки в канавку предварительно засыпают флюс. Подкладка может быть неподвижной или скользящей.

Остающуюся стальную подкладку используют в некоторых случаях при сварке сталей. Ее толщина составляет до 40% толщины свариваемого металла (но не более 4...5 мм) при ширине 30...50 мм (рис. 3.13в.). Сварной шов должен частично проплавливать и подкладку. Стальную подкладку под стыком закрепляют на прихватках, что требует кантовки изделия. Кроме того, увеличивается

расход металла. Зазор между подкладкой и деталью может быть причиной появления трещин в шве при переменных нагрузках.

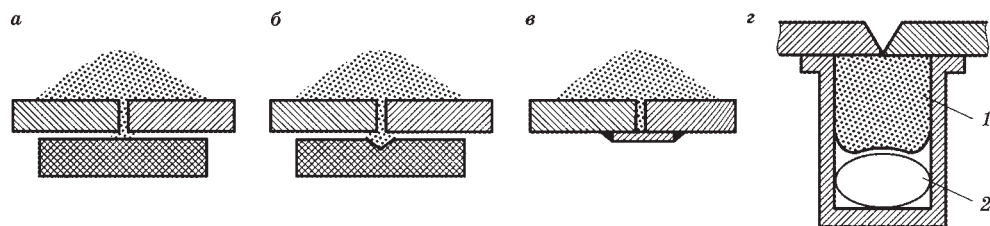


Рис. 3.13

Схемы подкладок, применяемых при сварке листового материала под флюсом:

a — медная; *б* — медная с канавкой; *в* — стальная; *г* — флюсовая подушка; 1 — флюс; 2 — брезентовый рукав.

Сварка с предварительной подваркой корня шва технологически более удобна. Подварочный шов можно выполнять вручную покрытыми электродами или плавящимся электродом в защитном газе. Глубина провара должна достигать $1/3$ толщины свариваемого металла. Требования к равномерности зазора по длине стыка снижаются.

Сварка на флюсовой подушке (рис. 3.13г) допускает меньшую точность сборки стыка под сварку, чем сварка на подкладке. Свариваемые листы укладывают на стеллаж, в котором смонтирована флюсовая подушка. Воздух, подаваемый в брезентовый рукав, поджимает лоток с флюсом.

При сварке кольцевых швов изнутри флюс снаружи поджимается флюсоременной подушкой, движение которой обеспечивается за счет трения о поверхность изделия (рис. 3.14а). Сварка первым слоем производится изнутри сосуда, а последующими — снаружи.

При сварке снаружи кольцевых швов труб диаметром до 800 мм часто применяют флюсомедные подкладки, которые могут быть неподвижными или перекатывающимися (рис. 3.14б, в).

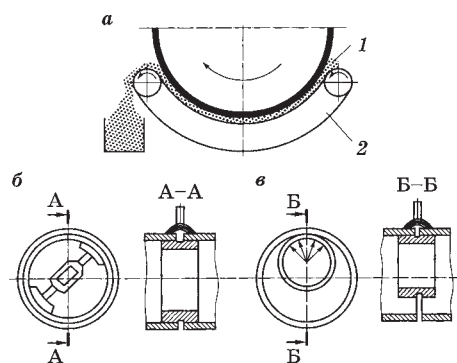


Рис. 3.14

Флюсовая подушка (*a*) и флюсомедные неподвижные (*б*) и перекатывающиеся (*в*) подкладки для сварки кольцевых швов:

1 — флюс; 2 — ременная передача.

Применяют также самоклеящиеся гибкие флюсонесущие ленты, ленты из стекловолокна, съемные подкладки одно- или многоразового пользования из спрессованного флюса или многослойного керамического формирующего материала в виде специальных пластин. Подкладки закрепляют с помощью эксцентриков, рычажных и винтовых поджимов и другими способами. Если формирование обратного валика при сварке на весу или съемных подкладках является неудовлетворительным, корень шва вырубает или выплавляют и заваривают подварочным швом.

3.2.4. ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА ПРИ СВАРКЕ ПОД ФЛЮСОМ

Параметры режима условно можно разбить на основные и дополнительные. Основными являются: величина, род и полярность тока, напряжение дуги, диаметр и скорость подачи электродной проволоки, скорость сварки (табл. 3.2). К дополнительным параметрам режима можно отнести: длину вылета электродной проволоки, состав и строение флюса (плотность, размеры частиц), положение изделия и электрода при сварке.

Таблица 3.2

Типовые режимы сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей на флюсовой подушке

Толщина металла, мм	Ширина зазора в стыке, мм	d , мм	$I_{св}$, А	U_d , В	$V_{св}$, м/ч	Давление воздуха в шланге флюсовой подушки, кПа
2	0...1,0	1,6	120	24...28	43,5	80
3	0...1,5	2,0	275...300	28...30	44,0	
		3,0	400...425	25...28	70,0	
5	0...2,5	2,0	425...500	32...34	35,0	100...150
		4,0	575...625	28...30	46,0	108
8	0...3,5	4,0	725...775	30...36	34,0	100...150

Сварочный ток оказывает наибольшее влияние на форму и размеры шва. При его увеличении (рис. 3.15а) интенсивно повышаются глубина проплавления и высота усиления шва, а его ширина возрастает незначительно. Род и полярность тока тоже оказывают влияние на глубину провара. По сравнению с постоянным током прямой полярности сварка на постоянном токе обратной полярности на 40...50%, а на переменном на 25...30% увеличивает глубину проплавления.

Увеличение напряжения на дуге увеличивает ширину сварного шва, глубина проплавления практически не меняется, высота усиления снижается (рис. 3.15б).

Диаметр электродной проволоки оказывает значительное влияние на форму и размеры шва, особенно на глубину проплавления, которая возрастает при уменьшении диаметра используемой электродной проволоки.

Скорость подачи электродной проволоки для поддержания стабильного горения дуги при данном диаметре должна соответствовать определенной силе сварочного тока и напряжению на дуге. С увеличением вылета электрода скорость подачи при постоянстве остальных параметров режима необходимо повышать. При использовании легированных проволок с повышенным электрическим сопротивлением скорость подачи должна возрастать.

Влияние *скорости сварки* (рис. 3.15в) на глубину проплавления и ширину шва носит сложный характер. Сначала при увеличении скорости сварки давление дуги все больше вытесняет жидкий металл, толщина прослойки жидкого металла под дугой уменьшается и глубина проплавления

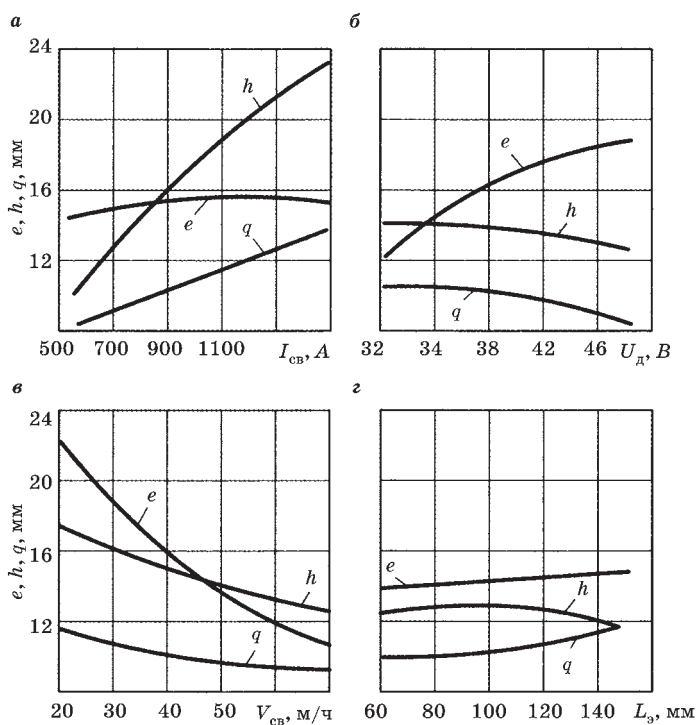


Рис. 3.15
Влияние сварочного тока (а), напряжения дуги (б), скорости сварки (в) и вылета электрода (г) на размеры и форму шва:
 e — ширина шва; h — глубина проплавления; q — высота усиления.

возрастает. При дальнейшем увеличении скорости сварки (более 20 м/ч) заметно уменьшается погонная энергия и глубина проплавления начинает уменьшаться. Во всех случаях при увеличении скорости сварки ширина шва уменьшается. При скорости сварки более 70...80 м/ч по обеим сторонам шва возможны несплавления с кромками основного металла или подрезы.

Влияние *вылета* в диапазоне 50...150 мм при диаметре электрода более 3 мм на форму сварного шва не существенно (рис. 3.15г).

Наклон электрода вдоль шва и положение детали также оказывают влияние на форму шва. Обычно сварку выполняют вертикально расположенным электродом, но в отдельных случаях она может производиться с наклоном электрода углом вперед или углом назад. При сварке углом вперед жидкий металл подтекает под дугу, толщина его прослойки увеличивается, а глубина проплавления уменьшается. При сварке углом назад прослойка уменьшается, проплавление возрастает.

Наклон изделия изменяет глубину проплавления. При сварке на подъем глубина проплавления растет и увеличивается вероятность прожога. При сварке на спуск металл сварочной ванны, подтекая под дугу, уменьшает глубину проплавления и появляется опасность образования несплавлений и шлаковых включений.

Изменение температуры изделия в пределах от -60 до $+350^{\circ}\text{C}$ практически не влияет на форму шва. При подогреве изделия до более высокой температуры возрастает глубина и особенно ширина шва.

3.2.5. ТЕХНИКА СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ШВОВ И СОЕДИНЕНИЙ

Стыковые соединения и швы. *Односторонними* односторонними стыковыми швами соединяют металл толщиной до 20 мм. Более толстый металл сваривают двусторонними односторонними или многопроходными швами.

При односторонней сварке металла толщиной 4...6 мм без разделки кромок стремятся уменьшить зазор при сборке. Стыки более толстого металла (10...12 мм) для увеличения глубины провара собирают с зазором. Но в обоих случаях формирующие подкладки или подварка обязательны.

Сварка на весу (без подкладок) возможна только при условии плотной и точной сборки стыка без зазоров. Глубина провара не должна превышать $2/3$ толщины металла, в противном случае возможны прожоги. Сварку на весу односторонних швов применяют для неответственных конструкций из тонкого металла или конструкций, в которых по условиям эксплуатации допустим непровар в корне шва.

Двусторонняя автоматическая сварка менее производительна, чем односторонняя, но более надежна, так как на качество швов в меньшей степени влияет изменение режимов сварки, точность сборки, не требуется сложных устройств для формирования корневой части шва.

Сварка первого шва по этой технологии выполняется на флюсовой подушке или на весу. Сварка второго шва с обратной стороны выполняется после зачистки корневого участка первого шва. Техника сварки первого прохода такая же, как и для односторонних швов.

Во всех случаях режимы сварки необходимо выбирать таким образом, чтобы глубина провара первого слоя составляла примерно половину толщины свариваемого металла. Второй шов сваривают с более глубоким проваром, равным 0,65...0,7 толщины свариваемого металла.

Многопроходные двусторонние стыковые швы применяют для соединения металла средних и больших толщин (преимущественно более 20 мм) с обязательной разделкой кромок. Число слоев определяется толщиной металла и режимом сварки. При многопроходной сварке предпочтительнее Х-образная разделка.

При соединении металлов большой толщины (до 300 мм) сварку ведут в узкий зазор (щелевая разделка) между свариваемыми кромками шириной 16...36 мм. Это позволяет уменьшить деформации и остаточные напряжения в швах.

Сварка тавровых, угловых и нахлесточных соединений. Сварку угловых швов в таких соединениях выполняют вертикальным электродом «в лодочку», наклонным электродом в угол или вертикальным электродом с оплавлением кромки верхнего листа.

При сварке «в лодочку» (рис. 3.16а) шов формируется хорошо, но применение подкладок затруднено, поэтому зазор между деталями не должен превышать 1,5 мм. Техника сварки при положении «в лодочку» не отличается от сварки стыковых швов с разделкой кромок. За один проход можно сварить шов

с катетом до 14 мм. Для обеспечения провара при различной толщине свариваемых элементов сварку осуществляют в несимметричную «лодочку» или несимметрично наклонным электродом.

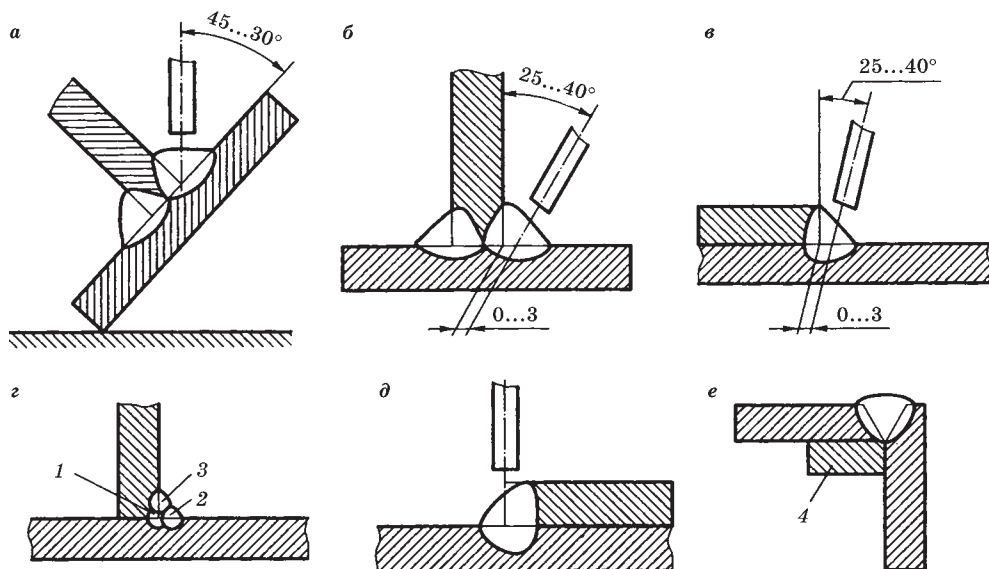


Рис. 3.16
Схемы сварки угловых швов:

a — вертикальным электродом таврового соединения «в лодочку»; *б* и *в* — наклонным электродом таврового и нахлесточного соединений; *г* — наклонным электродом многопроходного шва таврового соединения; *д* — вертикальным электродом нахлесточного соединения; *е* — вертикальным электродом углового соединения с подкладкой; 1–3 — последовательность выполнения проходов; 4 — подкладка.

Способ сварки наклонным электродом «в угол» не требует специальных мер против вытекания жидкого металла, поэтому допустима сборка с зазором до 3 мм. Возможность образования подреза на вертикальной полке не позволяет при однопроводной сварке получать шов с катетом более 6 мм. Для предупреждения подреза электрод смещают (рис. 3.16*б* и *в*). Многопроходные швы выполняют так, чтобы ранее наложенный валик препятствовал стеканию металла и шлака при сварке последующих слоев (рис. 3.16*г*).

Сварку нахлесточных соединений вертикальным электродом с *оплавлением верхней кромки* (рис. 3.16*д*) применяют, когда толщина листа не превышает 8 мм. При этом формируются угловые швы с вертикальным катетом, равным толщине верхнего листа. Горизонтальный катет обычно больше вертикального в 1,5...2 раза.

Угловые соединения можно сваривать вертикальным электродом с медной подкладкой (рис. 3.16*е*) или с гибкими самоклеящимися флюсонесущими лентами.

Сварку нахлесточных и тавровых соединений иногда выполняют *точечным* или *прорезным швом*. В этом случае для предупреждения вытекания расплавленного флюса и металла зазор между деталями не должен превышать 1 мм.

Точки можно сваривать с проплавлением верхнего листа толщиной до 10 мм (рис. 3.17б) или по предварительно подготовленным отверстиям в верхнем листе, если его толщина более 10 мм (рис. 3.17а). При сварке с отверстием диаметр электрода должен быть равен $0,2 \dots 0,25$ диаметра отверстия.

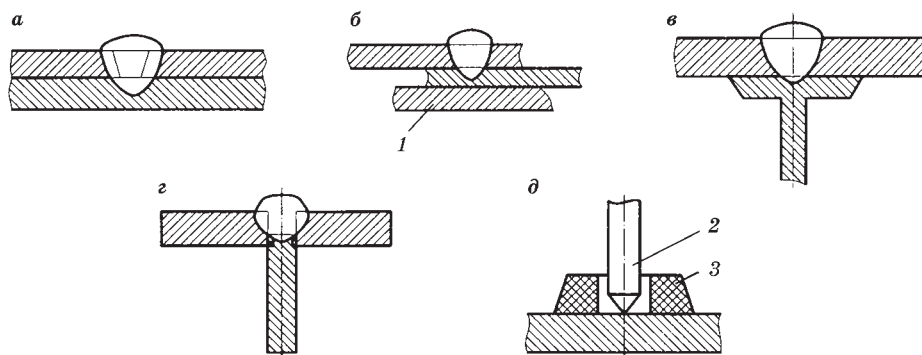


Рис. 3.17

Схемы выполнения точечных швов через отверстие в верхнем листе (а) и с проплавлением верхнего листа (б), пререзных швов (в и г) и приварки шпилек (д):

1 — медная подкладка; 2 — шпилька; 3 — флюсовая шайба.

Пререзные швы также могут выполняться по предварительно подготовленным отверстиям удлиненной формы или с проплавлением верхнего листа при его толщине до 10 мм (рис. 3.17в и г). Общим недостатком таких швов является трудность контроля их качества и в частности провара нижнего листа.

Приварка шпилек. Для приварки шпилек используют специальные установки и флюсовые шайбы (смесь из 90% флюса и 10% жидкого стекла) высотой 6–10 мм с наружным диаметром 15–20 мм (рис. 3.17д). При диаметре шпильки более 8 мм для облегчения возбуждения дуги привариваемый конец затачивают на угол 90° . После обрыва дуги и образования достаточной сварочной ванны шпильку быстро подают до упора.

Сварка стыков труб. Сварку стыковых соединений трубопроводов под флюсом выполняют в нижнем положении с наружной и внутренней стороны стенки трубы. В связи с возможностью стекания шлака минимальный диаметр свариваемых труб обычно более 150 мм. Для регулирования глубины проплавления и формы шва электрод смещают навстречу вращению трубы. Сварку корневого шва часто выполняют ручной дуговой или сваркой в защитных газах плавящимся электродом.

3.3. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

Сварка в защитных газах — это дуговая сварка, при которой дуга и расплавленный металл, а в некоторых случаях и остывающий шов, находятся в защитном газе, подаваемом в зону сварки с помощью специальных устройств.

3.3.1. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

Сущность процесса. Сварку в защитных газах можно выполнять неплавящимся, обычно вольфрамовым, или плавящимся электродом (рис. 3.18). В первом случае сварной шов получается за счет расплавления кромок изделия и, если необходимо, подаваемой в зону дуги присадочной проволоки. В процессе сварки плавящимся электродом металла шва образуется при участии электродного и основного металлов.

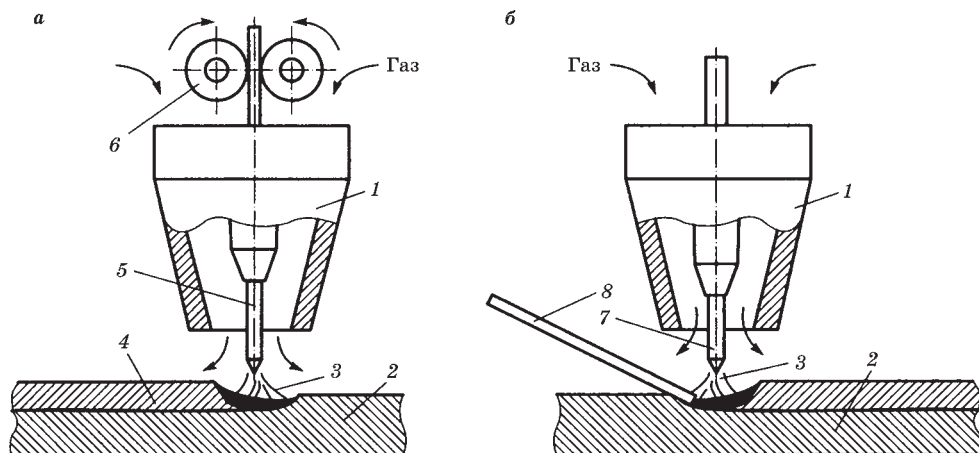


Рис. 3.18

Схема сварки в среде защитных газов плавящимся (а) и неплавящимся (б) электродом:

1 — сопло горелки; 2 — свариваемая деталь; 3 — дуга; 4 — сварной шов; 5 и 7 — плавящийся и неплавящийся (вольфрамовый) электроды; 6 — подающий механизм; 8 — присадочный материал.

Наиболее распространенной является струйная местная защита потоком газа, истекающим из сопла сварочной горелки. Качество струйной защиты зависит от конструкции и размеров сопла, расстояния от среза сопла до поверхности свариваемого материала и расхода защитного газа.

Для улучшения струйной защиты на входе в сопло горелки устанавливают мелкие сетки и пористые материалы, позволяющие дополнительно выравнивать поток газа на выходе из сопла. Расход защитного газа должен обеспечивать ламинарное течение струи.

В зону сварки защитный газ может подаваться концентрично вокруг дуги, а при повышенных скоростях сварки плавящимся электродом — сбоку (рис. 3.19).

Используют защиту двумя потоками газов, при этом наружный поток обычно состоит из углекислого газа. При сварке активных материалов для предупреждения контакта воздуха не только с расплавленным, но и с нагретым твердым металлом применяют удлиненные насадки на сопла. Наиболее надежная защита достигается при размещении изделия в стационарных камерах, предварительно вакуумированных и затем заполненных защитным газом. Для сварки крупногабаритных изделий используют переносные камеры из мягких

пластичных, обычно прозрачных, материалов, устанавливаемых локально над свариваемым стыком.

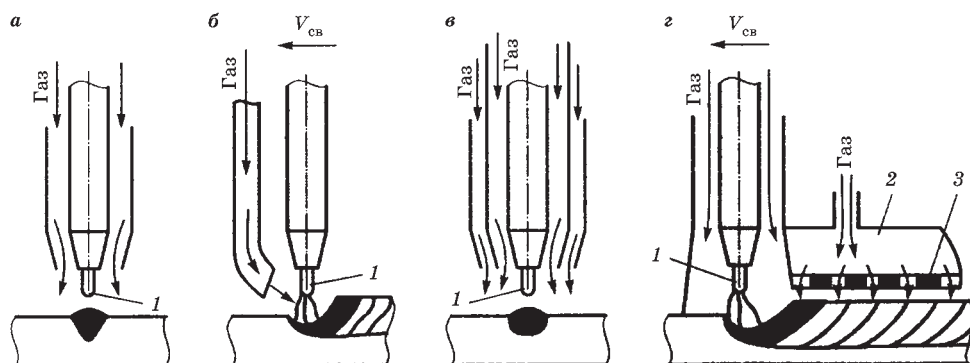


Рис. 3.19

Схемы потоков защитных газов в зоне сварки:

а — центральный; б — боковой; в — два concentric потока; г — подача газа в сопло и насадку; 1 — электрод; 2 — насадка; 3 — распределительная сетка.

Механизированную сварку в защитных газах обычно ведут на весу. Автоматическую сварку можно осуществлять на остающихся или съемных подкладках, снабженных устройствами для подачи газа (рис. 3.20). Такие подкладки улучшают формирование корня шва, а при сварке активных металлов способствуют защите нагретого твердого металла от воздействия воздуха. Подаваемые в подкладку газы по составу аналогичны газам, применяемым для защиты зоны сварки.

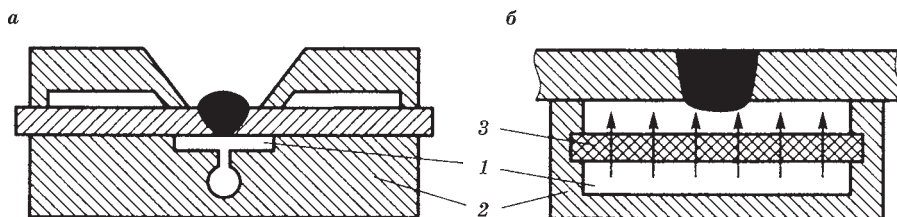


Рис. 3.20

Схемы медных (а) и стальных (б) съемных подкладок для защиты обратной стороны шва при односторонней сварке:

1 — защитный газ; 2 — подкладка; 3 — распределительная сетка.

Защитные газы. В качестве защитных газов используют инертные газы (аргон, гелий и их смеси), не взаимодействующие с металлом при сварке, и активные газы (углекислый газ, кислород, водород и др.), взаимодействующие с металлом, а также их смеси. Защитный газ определяет физические, металлургические и технологические характеристики способа сварки и выбирается в зависимости от состава свариваемых материалов и требований, предъявляемых к сварным соединениям.

Для повышения устойчивости дуги, увеличения глубины проплавления или изменения формы шва металлургической обработки расплавленного металла, повышения производительности сварки применяют смеси инертных газов с активными газами.

Смесь аргона с 1...5% кислорода используют для сварки низкоуглеродистой и легированной стали. Добавка кислорода к аргону понижает критический ток, предупреждает возникновение пор, улучшает форму шва.

Смесь аргона с 10...25% углекислого газа при сварке углеродистых сталей позволяет избежать образования пор, несколько повышает стабильность дуги и надежность защиты зоны сварки при наличии сквозняков, улучшает формирование шва при сварке тонколистового металла.

Смесь аргона с углекислым газом (до 20%) с добавкой не более 5% кислорода используют при сварке углеродистых и легированных сталей. Добавки активных газов улучшают стабильность дуги, формирование швов и предупреждают пористость.

Смесь углекислого газа с кислородом (до 20%) применяют при сварке углеродистой стали. Эта смесь имеет высокую окислительную способность, обеспечивает глубокое проплавление и хорошую форму шва, уменьшает пористость.

Теплофизические свойства защитных газов оказывают большое влияние на технологические свойства дуги, а значит, и на форму и размеры шва. Дуга в гелии по сравнению с дугой в аргоне имеет более высокое напряжение, а образующийся шов имеет меньшую глубину проплавления и большую ширину. Углекислый газ по влиянию на форму шва занимает промежуточное положение.

При необходимости металлургической обработки и дополнительного легирования шва в зону дуги подают небольшое количество раскисляющих или легирующих веществ. Указанные вещества проще всего ввести при помощи порошковой проволоки. Шлакообразующие вещества вводят в виде пыли или паров вместе с защитным газом, в виде магнитного флюса или флюса, засыпаемого в разделку кромок, и другими способами. Состав металла шва можно изменить путем подачи в зону сварки дополнительной присадочной проволоки, а также двухфазовой сварки в общую ванну с использованием проволок различного состава.

Преимущества и недостатки способа. Основными преимуществами способа сварки в защитных газах являются следующие:

- высокое качество сварных соединений разнообразных металлов и их сплавов разной толщины, особенно при сварке в инертных газах из-за малого угара легирующих элементов;
- возможность сварки в различных пространственных положениях; отсутствие операций по засыпке и уборке флюса и удалению шлака;
- возможность наблюдения за образованием шва и легкость механизации и автоматизации процесса.

К недостаткам способа относятся: необходимость применения защитных мер против световой и тепловой радиации дуги, возможность нарушения газовой защиты при сдувании струи и, в некоторых случаях, трудность осуществления водяного охлаждения горелок.

3.3.2. ПОДГОТОВКА ДЕТАЛЕЙ ПОД СВАРКУ И ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА

Подготовка деталей под сварку. Способы подготовки кромок под сварку (механические, газовые и т. д.) такие же, как и при других способах сварки. Вид разделки кромок и ее геометрические размеры должны соответствовать ГОСТ 14771-76 или техническим условиям на изготовление изделия.

При механизированной сварке плавящимся электродом можно получить полный провар без разделки кромок и без зазора между ними при толщине стали до 8 мм. Сборка с зазором или разделкой кромок позволяет получить полный провар при толщине металла до 11 мм.

Для защиты от брызг поверхность детали покрывают специальными аэрозольными препаратами. Детали собирают с помощью струбцин, клиньев, скоб или на прихватках. Прихватки лучше выполнять тем же способом, которым будет проводиться сварка, а при сварке переплавлять.

3.3.3. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА

К основным параметрам режимов сварки в защитных газах относятся: диаметр неплавящегося электрода или электродной проволоки, сварочный ток, род тока и полярность, напряжение дуги, скорость подачи электродной и присадочной проволоки, скорость сварки. Дополнительными параметрами режима являются вылет электрода, расход защитного газа, наклон электрода вдоль оси шва, частота и амплитуда поперечных колебаний.

Диаметр неплавящегося (вольфрамового) электрода обычно выбирают в пределах 1...6 мм в зависимости от требуемого значения сварочного тока. При этом следует учитывать, что допустимая плотность тока уменьшается от 6 А/мм² при постоянном токе прямой полярности до 2,5 А/мм² при переменном токе и до 0,5 А/мм² при постоянном токе обратной полярности и зависит также от состава защитного газа.

Диаметр электродной проволоки выбирают в пределах 0,5...3 мм в зависимости от толщины свариваемого металла и положения в пространстве. С уменьшением диаметра проволоки при прочих равных условиях повышается устойчивость горения дуги, увеличиваются глубина проплавления и коэффициент наплавки.

Сварочный ток устанавливают в зависимости от толщины свариваемого металла, требуемой глубины проплавления и диаметра электрода. С увеличением сварочного тока повышается глубина проплавления. Это приводит к увеличению доли основного металла в шве. Ширина шва изменяется мало. Род тока и полярность определяется материалом электрода и изделия.

Напряжение дуги устанавливается в зависимости от выбранного сварочного тока. С ростом напряжения дуги глубина проплавления уменьшается, а ширина шва увеличивается. Чрезмерное увеличение напряжения дуги при сварке плавящимся электродом сопровождается повышенным разбрызгиванием, ухудшением газовой защиты и образованием пор в наплавленном металле.

Скорость подачи электродной проволоки связана со сварочным током. Ее устанавливают с таким расчетом, чтобы в процессе сварки не происходило коротких замыканий и обрывов дуги и плавление электрода было устойчивым.

Скорость сварки устанавливают в зависимости от толщины свариваемого металла с учетом требуемой формы шва. С увеличением скорости уменьшаются все геометрические размеры шва. При большой скорости сварки ухудшается защита зоны плавления. Малая скорость сварки приводит к увеличению объема и перегреву металла сварочной ванны.

Величина вылета электрода, а также расстояние от сопла горелки до поверхности металла зависит от выбранного диаметра неплавящегося электрода или электродной проволоки. С увеличением вылета электрода ухудшаются устойчивость горения дуги и формирование шва, а также увеличивается разбрызгивание при сварке плавящимся электродом.

Расход защитного газа зависит в основном от тепловой мощности дуги или от силы тока. Скорость сварки, конфигурация изделия и наличие движения воздуха в цехе, ветра, сквозняков также должны быть учтены при выборе расхода газа. Расход гелия из-за его меньшей плотности должен быть увеличен по сравнению с аргоном или углекислым газом.

Наклон электрода вдоль оси шва оказывает влияние на глубину проплавления и качество шва. При сварке углом вперед ширина шва возрастает, а глубина проплавления уменьшается. Сварку углом вперед применяют при небольших толщинах металла, когда существует опасность прожога. При сварке углом назад повышается глубина проплавления.

Поперечные колебания электрода влияют на форму шва и проплавления и размеры сварочной ванны. С ростом амплитуды колебаний увеличивается ширина шва и снижается глубина проплавления по оси шва. Изменение частоты колебаний позволяет регулировать объем расплавленного металла сварочной ванны.

3.3.4. СВАРКА НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ

Дуговой сваркой вольфрамовым электродом можно сваривать все типы соединений в различных пространственных положениях. Применение этого способа целесообразно для соединения металла толщиной до 5–6 мм. Однако его можно использовать и для сварки металла большей толщины. Сварка выполняется без присадочного металла, когда шов формируется за счет расплавления кромок, и с присадочным металлом, подаваемым в зону дуги в виде сварочной проволоки. Как правило, сварку ведут при напряжении дуги 22...34 В, при этом длина дуги должна быть 1,5...3 мм. Вылет конца электрода из сопла не должен превышать 3...5 мм, а при сварке угловых швов и стыковых с разделкой — 5...7 мм.

Сварочные материалы. В качестве неплавящегося электрода используют преимущественно стержни из вольфрама, реже — стержни из графита. Наибольшее распространение получили электроды ЭВЛ и ЭВИ диаметром 0,5...10 мм, выдерживающие большую токовую нагрузку.

Основным защитным газом является аргон. Горение дуги в гелии происходит при более высоком напряжении (в 1,4...1,7 раза выше, чем в аргоне). Это требует применения для питания дуги источников с повышенным напряжением холостого хода. Применение аргон-гелиевых смесей целесообразно в тех случаях, когда требуется повысить проплавляющую способность дуги без

увеличения сварочного тока. Используют и некоторые другие газы, например, азот и водород или их смеси с аргоном. Для защиты вольфрамовых электродов не допускается использовать газы, содержащие кислород.

Особенности процесса сварки. Аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом может выполняться с местной или общей защитой, без подачи или с подачей присадочной проволоки, на постоянном или переменном токе. Большинство металлов сваривают на постоянном токе прямой полярности.

При сварке на постоянном токе прямой полярности обеспечиваются лучшие условия для термоэлектронной эмиссии с электрода, выше его стойкость и допускаемый предел силы тока. Например, для вольфрамового электрода диаметром 3 мм максимальный ток ориентировочно составляет при прямой полярности 240–280 А, при обратной — лишь 20–45 А, при сварке на переменном токе — 140–160 А. Дуга на прямой полярности легко возбуждается и горит при напряжении 10–15 В в широком диапазоне плотностей тока.

При сварке на *постоянном токе обратной полярности* возрастает напряжение дуги, уменьшается устойчивость горения, резко снижается стойкость электрода, повышаются его нагрев и расход. Однако при обратной полярности происходит очистка поверхности металла, удаление поверхностных оксидов за счет бомбардировки катода тяжелыми положительными ионами аргона (катодное распыление).

На *переменном токе* реализуются преимущества дуги прямой и обратной полярностей, т. е. обеспечиваются устойчивость вольфрамового электрода и разрушение поверхностных оксидов на изделии. Указанное свойство используют при сварке алюминия, магния, бериллия и их сплавов, имеющих на поверхности прочные оксидные пленки. При этом удаление пленки происходит в полупериод с обратной полярностью сварочного тока, когда свариваемое изделие является катодом.

Расход вольфрамовых электродов невелик. При сварке на переменном токе рабочий конец вольфрамового электрода затачивают в виде полусферы. При сварке на постоянном токе конец электрода затачивают под углом 60° на длине 2...3 диаметров или в виде четырехгранной пирамиды. Для уменьшения расхода электрода подачу защитного газа начинают за 10...15 с до возбуждения дуги, а заканчивают через 5...10 с после обрыва дуги и дугу возбуждают, не касаясь концом электрода изделия, а используя осцилляторы или разряд конденсаторов.

Технологические свойства дуги зависят от рода тока. При прямой полярности на изделии выделяется около 70% тепла, что обеспечивает более глубокое проплавление основного металла. Электропроводимость дуги выше, когда катод на электроде, и ниже, когда катод на изделии. В соответствии с этим и сила сварочного тока неодинакова в различные полупериоды переменного тока — больше при прямой и меньше при обратной полярности, т. е. проявляется выпрямляющий эффект сварочной дуги, связанный с различием теплофизических свойств электрода и изделия.

Разновидности сварки неплавящимся электродом. *Сварка по окисленной поверхности* повышает эффективность выделения тепла в дуге и на изделии. Наличие окислов уменьшает блуждание дуги по основному металлу, и глубина

проплавления возрастает на 15...30%, при этом толщина окисной пленки должна быть в пределах 20...200 мкм.

Сварка по слою флюса толщиной до 0,25 мм, состоящего из галогенидов и некоторых окислов, увеличивает глубину проплавления благодаря концентрации тепловой энергии в активном пятне на изделии и повышению эффективной мощности дуги.

Сварка погруженной дугой реализуется при увеличении расхода защитного газа, что позволяет обжечь дугу и повысить ее температуру. Давление защитного газа и дуги, оттесняя расплавленный металл, способствует углублению дуги в основной металл. При толщине металла до 10 мм поток газа создает в металле сквозное отверстие. Металл, оплавленный на передней кромке, перемещается в хвостовую часть ванны и, кристаллизуясь, образует шов.

Сварка пульсирующей или импульсной дугой осуществляется при изменении тока по определенной программе. Способ находит применение при сварке металла толщиной от долей миллиметров до 3...4 мм. Ток, необходимый для сварки, включают импульсами с заданной частотой (рис. 3.21). Это уменьшает

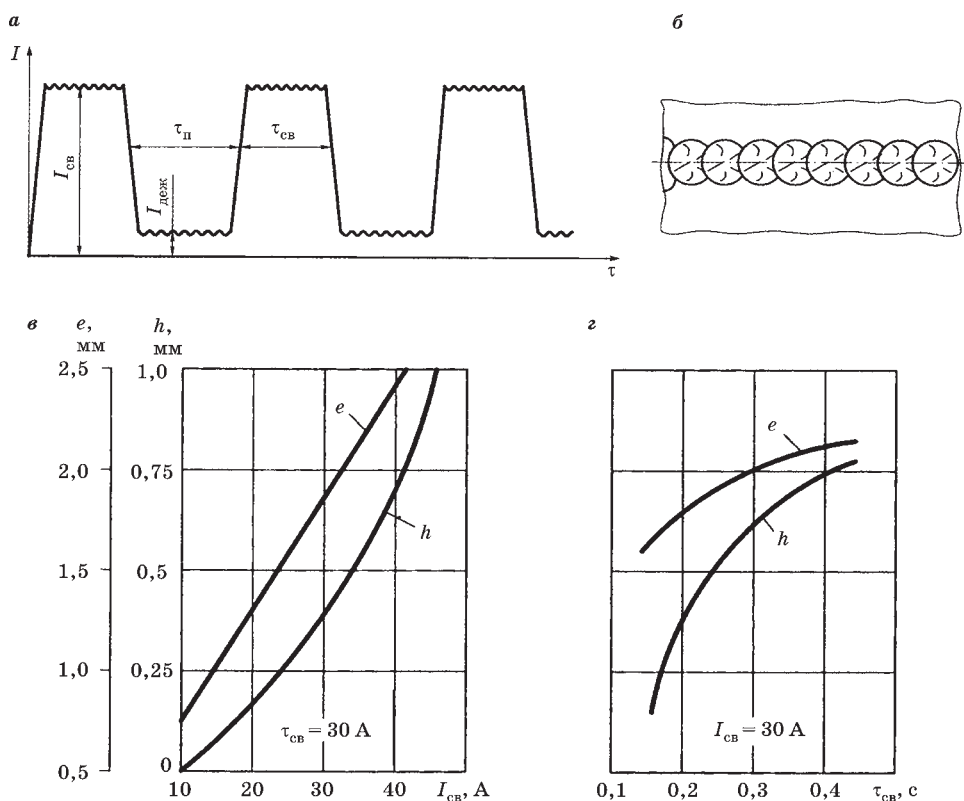


Рис. 3.21

Изменение силы тока (а), формы шва в плоскости листа (б) и размеров шва (в, г) при импульсной сварке вольфрамовым электродом в аргоне:

$I_{св}$ — сила сварочного тока; $I_{деж}$ — сила тока дежурной дуги; $\tau_{св}$ — длительность сварочного импульса; $\tau_{п}$ — длительность паузы.

размеры сварочной ванны, которая в паузах между импульсами тока частично кристаллизуется, что снижает вероятность прожогов. Для уменьшения деионизации дугового промежутка между импульсами поддерживается дежурная дуга с уменьшенным током $I_{\text{деж}}$. Регулируя соотношение между $I_{\text{св}}$ и $I_{\text{деж}}$, $\tau_{\text{св}}$ и $\tau_{\text{п}}$, а также скорость сварки, изменяют форму и размеры шва.

Техника сварки неплавящимся электродом. При сварке стыковых соединений металла толщиной до 2,5 мм возникают деформации кромок, приводящие к нарушению формирования шва. Для их предупреждения применяют клавишные прижимные приспособления, сборку соединений под углом $7...10^\circ$ или местный отгиб кромок в сторону подкладки.

Ручную сварку металла толщиной до 10 мм выполняют углом вперед. Для сварки материала толщиной свыше 10 мм следует применять сварку углом назад. Такое положение горелки относительно изделия рекомендуется и при сварке угловых соединений.

При механизированной и автоматической сварке вольфрамовый электрод располагают перпендикулярно поверхности изделия. Угол между ним и присадочной проволокой приближается к 90° .

При сварке металла толщиной 60 мм и более целесообразно использовать многослойную сварку в щелевой зазор с присадочной проволокой. Для этого кромки соединения готовят без скоса (под 90° к поверхности) и собирают с зазором 6–8 мм. Первый слой сваривают на медной съёмной подкладке или на остающейся подкладке. Диаметр вольфрамового электрода — 2,5...4 мм, сварочный ток до 400 А. Качество соединения можно повысить, если применить электроды с отогнутым рабочим концом и в процессе сварки сообщить им вращательные движения в щели от одной кромки к другой (рис. 3.22). Зону сварки защищают аргоном или смесью из равных долей аргона и гелия.

Сварка плавящимся электродом в инертных газах.

Наиболее распространена сварка одним электродом (однодуговая сварка). В зависимости от свариваемого материала, его толщины и требований, предъявляемых к сварному соединению, в качестве защитных газов используют инертные газы или их смеси. Благодаря более высокой стабильности дуги процесс осуществляют преимущественно на постоянном токе обратной полярности от источников с жесткой внешней характеристикой. Помимо параметров режима, на стабильность горения дуги, форму и размеры шва влияет состав защитного газа и характер переноса электродного металла в сварочную ванну.

Основные параметры процесса сварки. Сила тока регулируется скоростью подачи электродной проволоки. Увеличение тока сверх определенной величины (выше критического) при

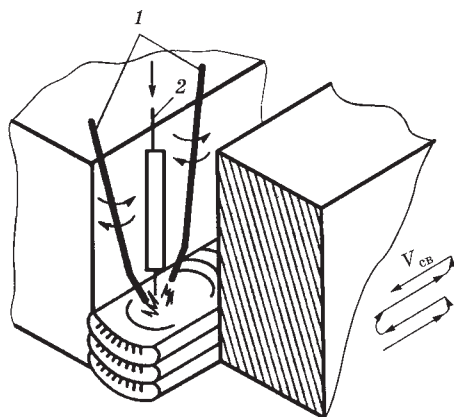


Рис. 3.22

Схема сварки в щелевой зазор:

1 — вольфрамовые электроды;
2 — присадочная проволока.

аргонно-дуговой сварке плавящимся электродом приводит к резкому переходу от капельного к струйному (мелкокапельному) переносу электродного металла. При этом повышаются стабильность горения дуги и глубина проплавления по оси шва. Критический ток уменьшается при увеличении вылета электрода и при добавлении к аргону до 5% кислорода.

Напряжение дуги устанавливается примерно равным напряжению холостого хода источника тока.

Поперечные колебания электрода расширяют технологические возможности способа, позволяют получать широкие валики и улучшать формирование корня шва при сварке на весу и в различных пространственных положениях. Траектория поперечных колебаний электрода зависит от толщины металла и формы разделки.

Расстояние от сопла горелки до изделия для обеспечения качественной газовой защиты выдерживают в пределах 10...15 мм.

Токоподводящий наконечник должен утапливаться в сопло на глубину до 3 мм или при сварке угловых швов и стыковых швов с глубокой разделкой может выступать из сопла на 5–10 мм.

Закономерности изменения формы и размеров шва в зависимости от основных параметров режима примерно такие же, как и при сварке под флюсом. Режимы аргонодуговой сварки сталей плавящимся и неплавящимся электродом приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Режимы аргонодуговой сварки высоколегированных сталей

Тип соединения	Толщина металла, мм	d , мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	Расход газа, дм ³ /мин	Число проходов	Примечание
Ручная сварка неплавящимся электродом							
С отбортовкой	2	—	75...120	—	5...7	1	Постоянный ток прямой полярности
Встык, без разделки кромок, с присадкой	3		120...160		6...8		
Автоматическая сварка неплавящимся электродом							
Встык, с присадкой	4	—	200...250	25...27	6..8	1	Постоянный ток прямой полярности
			130...250	25...28			
Встык, без присадки						—	
Автоматическая сварка плавящимся электродом							
V-образная разделка кромок	5	1,0	260...275	36...38	8...9	1	Постоянный ток обратной полярности
	10	2,0	320...400	14...16	12...18	2	

Для обеспечения управляемого мелкокапельного переноса при сварке плавящимся электродом применяют импульсный сварочный ток с частотой более 25 имп/с. При этом по определенной программе изменяют основные параметры процесса — напряжение и ток дуги. Возможно одновременное изменение скорости подачи проволоки или скорости сварки. При увеличении тока во время импульса резко возрастающие электродинамические силы сбрасывают каплю

с торца электрода. Импульсы могут быть одиночными или составлять группу. Импульсный режим оказывает воздействие также на процессы кристаллизации металла сварочной ванны и термический цикл сварки, улучшая свойства сварного соединения.

Техника сварки различных типов соединений и швов. Тонколистовой материал толщиной до 4 мм сваривают короткой дугой с периодическими замыканиями. Металл большей толщины сваривают на токах выше критических при струйном переносе электродного металла.

Стыковые соединения при механизированной сварке в нижнем положении выполняют углом вперед или углом назад. Положение электрода и изделия при автоматической сварке в нижнем положении такое же, как и при сварке под флюсом. Минимальная толщина свариваемого металла не менее 0,8 мм, а в ряде случаев не менее 1,5 мм.

Металл толщиной до 4 мм рекомендуется сваривать без разделки кромок в сборочно-сварочных приспособлениях на съёмных медных или нержавеющей подкладках либо на остающихся подкладках. Сварку ведут углом вперед проволокой 0,8...1,2 мм на малых токах и напряжениях.

Металл толщиной более 5 мм можно сваривать как на весу, так и на подкладках.

Толщины до 12 мм сваривают без разделки кромок или с V-образной разделкой под углом 50...60°, а большие толщины — с V-, U- и X-образной разделкой. Для улучшения формирования шва сварку ведут с поперечными колебаниями электрода.

Нахлесточные соединения металла толщиной до 1,5 мм обычно сваривают на медной или стальной подкладке. Дугу направляют на верхнюю кромку. Металл большей толщины сваривают на весу, с наклоном электрода поперек шва. Дугу направляют в угол среза кромки верхнего листа.

Угловые соединения выполняют как «в лодочку», так и наклонным электродом. В последнем случае электрод наклоняют на 50–60° к полке. При сварке тонколистового металла дугу направляют в угол. При толщине металла более 5 мм во избежание подрезов стенки электрод смещают в сторону полки.

Вертикальные швы выполняют проволокой диаметром 0,8...1,2 мм на режимах с частыми короткими замыканиями при минимальном напряжении или импульсной дугой. При сварке сверху вниз выше производительность и лучше формирование шва.

Металл больших толщин сваривают снизу вверх, хотя скорость сварки при этом в 1,5...3 раза меньше. Металл толщиной до 4 мм сваривают без поперечных колебаний электрода, а больших толщин — с колебаниями. Сила тока зависит от возможности удержания ванночки на вертикальной плоскости.

Импульсная дуга позволяет существенно упростить сварку вертикальных швов. Частота импульсов при сварке в аргоне металла толщиной до 3 мм — около 33 имп/с, при сварке листов толщиной 3...6 мм — 50 имп/с, а при большей толщине — 100 имп/с.

Горизонтальные швы выполняют тонкой проволокой на режимах с частыми короткими замыканиями и импульсной дугой. Металл толщиной до 3 мм сваривают без разделки кромок. При толщине металла более 4 мм необходим

скос кромки верхнего листа. На металле толщиной более 8 мм корневой шов сваривают тонкой проволокой с частыми короткими замыканиями, импульсно-дуговой сваркой или неплавящимся электродом. Разделку заполняют плавящимся электродом на больших токах, а облицовочный шов сваривают тем же способом, что и корневой.

Потолочные швы сваривают углом назад импульсной дугой тонкой проволокой на режимах с частыми короткими замыканиями и при струйном переносе, а также на пониженных напряжениях. Металл толщиной до 4 мм сваривают без поперечных колебаний электрода, а большей толщины — с колебаниями. Металл толщиной более 6 мм рекомендуется сваривать за несколько проходов.

3.3.5. СВАРКА ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В АКТИВНЫХ ГАЗАХ И СМЕСЯХ ГАЗОВ

При сварке в активных газах существенное влияние на качество шва, форму проплавления и потери на угар и разбрызгивание оказывает процесс переноса электродного металла. Перенос электродного металла при сварке сплошными проволоками может быть капельный, с короткими замыканиями дугового промежутка или струйный. Состав активного газа оказывает значительное влияние на перенос металла и форму проплавления. При сварке в углекислом газе и смеси $\text{Ar} + (> 25\%) \text{CO}_2$ на всех режимах, а также в смесях $\text{Ar} + \text{O}_2$ и $\text{Ar} + (< 15\%) \text{CO}_2$ с силой тока меньше критической перенос преимущественно капельный и форма провара такая же, как при сварке под флюсом. При сварке в смесях $\text{Ar} + \text{O}_2$ и $\text{Ar} + (< 15\%) \text{CO}_2$ с силой тока выше критической появляется струйный перенос и узкое глубокое проплавление по центру шва. В таблице 3.4 приведены данные о расходе углекислого газа в зависимости от диаметра сварочной проволоки.

Т а б л и ц а 3.4

Расход углекислого газа

Диаметр проволоки, мм	Сила сварочного тока, А	Расход газа, дм ³ /мин	Диаметр проволоки, мм	Сила сварочного тока, А	Расход газа, дм ³ /мин
0,8	60...120	8...9	1,6	160...260	14...15
1,0	60...140			270...380	15...18
1,2	80...220	9...12	2,0	180...300	
1,4	150...320	12...15		320...450	18...20

При использовании порошковых проволок может быть получен процесс сварки без коротких замыканий и с переносом металла каплями среднего размера.

Особенности процесса сварки. Процесс переноса с короткими замыканиями наблюдается при сварке тонкими проволоками и низких напряжениях на дуге (рис. 3.23). При оплавлении электрода образуется капля электродного металла и скорость плавления проволоки уменьшается при сохранении постоянной скорости ее подачи (интервал между точками τ_1 и τ_2). В результате электродная проволока приближается к ванне и капля замыкает дуговой промежуток. Напряжение резко уменьшается (точка τ_2), а сила тока в цепи возрастает. С увеличением тока пинч-эффект приводит к образованию шейки между электродной

проволокой и каплей и ускорению перехода капли в ванну. Утоненная шейка перегревается проходящим током и перегорает со взрывом (точка τ_3). Это является основной причиной повышенного разбрызгивания электродного металла при сварке с короткими замыканиями. Далее напряжение резко возрастает и зажигается дуга (точка τ_4). После этого весь цикл повторяется.

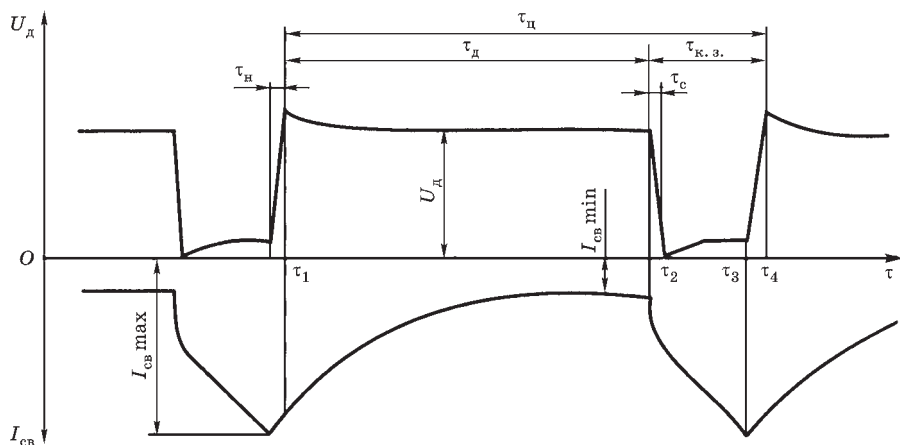


Рис. 3.23

Схема изменения напряжения дуги U_d и сварочного тока $I_{св}$ при дуговой сварке в CO_2 с короткими замыканиями:

τ_c — длительность цикла; τ_n и τ_c — длительность нарастания и спада напряжения; τ_d и $\tau_{к.з.}$ — длительность горения дуги и короткого замыкания.

С увеличением силы тока частота коротких замыканий увеличивается, а диаметр капель на электроде и потери на разбрызгивание уменьшаются. С повышением напряжения частота коротких замыканий уменьшается, увеличиваются диаметр капель на электроде, длительность их пребывания в зоне дуги, потери на окисление и разбрызгивание. При определенных значениях силы тока и напряжения процесс переходит в крупнокапельный.

С увеличением вылета электрода увеличиваются длина дуги, длительность периодов горения дуги и диаметр капель.

При сварке электродной проволокой диаметром до 1,6 мм и небольших сварочных токах при короткой дуге с напряжением до 22 В процесс идет с короткими замыканиями, частота которых достигает 450 с^{-1} . При этом потери на разбрызгивание не превышают 8%.

Состав проволоки отражается на процессе сварки в случаях, когда изменяются характеристики дугового разряда, поверхностное натяжение или удельное электрическое сопротивление проволоки.

Основные параметры режима сварки. Сварку в активных газах обычно выполняют на постоянном токе обратной полярности.

Сила тока зависит от диаметра и состава электрода, скорости подачи электродной проволоки, вылета электрода и состава газа (рис. 3.24). Силу тока регулируют путем изменения скорости подачи проволоки и напряжения дуги.

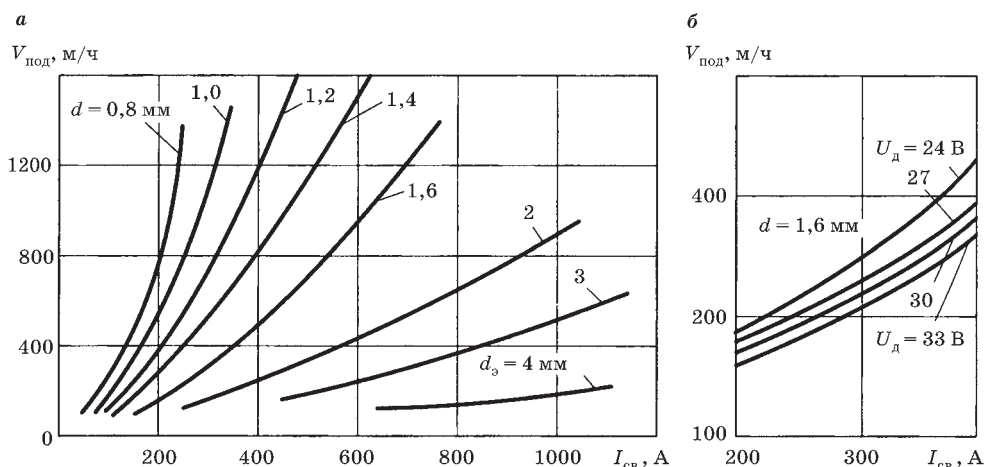


Рис. 3.24

Зависимость скорости подачи $V_{\text{п}}$ электродной проволоки марки Св08Г2С от силы тока при сварке на обратной полярности в CO_2 (а) и в смеси газов $\text{Ar} + \text{O}_2$ (б)

С повышением напряжения дуги увеличивается ширина шва, уменьшается высота усиления и улучшается форма шва, однако одновременно увеличиваются потери на разбрызгивание.

Вылет электрода при сварке проволоками диаметром $0,5 \dots 1,4$ мм влияет на стабильность процесса сварки. Обусловлено это изменением нагрева электрода на вылете проходящим током. При сварке проволоками диаметром $1,6$ мм и более влияние вылета электрода на стабильность процесса сварки намного меньше. Увеличение вылета позволяет повысить коэффициент расплавления электрода и уменьшает глубину проплавления.

При сварке углом вперед глубина провара уменьшается, а ширина шва увеличивается. При этом сварку можно вести на повышенных скоростях.

При сварке углом назад более 15° глубина провара несколько увеличивается, причем глубина провара при сварке в углекислом газе несколько больше, чем при сварке под флюсом.

Влияние скорости сварки примерно такое же, как при сварке под флюсом.

Процесс сварки на прямой полярности отличается большим разбрызгиванием. Скорость расплавления электрода увеличивается в $1,6 \dots 1,8$ раза.

Техника сварки различных типов соединений и швов. Стыковые соединения металла толщиной $0,8 \dots 1,2$ мм можно сваривать на медных или стальных подкладках, а также на весу. Для соединения металла таких толщин применяют сварку на обратной полярности проволокой $0,7 \dots 0,8$ мм на малых токах и напряжениях с частыми короткими замыканиями. В качестве защитных газов рекомендуют углекислый газ и смеси $\text{Ar} + 25\% \text{CO}_2$, $\text{Ar} + \text{O}_2 + 20\% \text{CO}_2$.

При сварке металла толщиной $1,2 \dots 2$ мм рекомендуют однопроводную сварку с периодическим прекращением процесса или с поперечными колебаниями электрода.

Металл толщиной более 3 мм обычно сваривают в несколько проходов или с двух сторон. Разделку кромок при сварке в CO_2 , учитывая большую глубину

провара, выполняют с меньшим углом раскрытия кромок, чем при сварке под флюсом.

При использовании смесей $Ar + CO_2$, $Ar + O_2 + CO_2$ и $Ar + O_2$ разделку кромок обычно делают такую, как при сварке под флюсом.

Нахлесточные соединения металла толщиной 0,8...1,5 мм сваривают на весу или на подкладке вертикальным электродом, направленным на кромку верхнего листа.

Металл толщиной более 1,5 мм сваривают на весу наклонным электродом. При сварке металла равных толщин электрод направляют в угол, а неравных — на лист большей толщины.

Угловые соединения выполняют наклонным электродом при вертикальном расположении стенки соединения (табл. 3.5). Швы с катетом более 8 мм рекомендуется сваривать «в лодочку» вертикальным электродом. В некоторых случаях при сварке металла большой толщины делают скос кромок. В этом случае электрод направляют в угол разделки.

Таблица 3.5

Режимы механизированной сварки в углекислом газе низкоуглеродистой стали

Катет шва, мм	Диаметр проволоки, мм	Режим сварки			Вылет электрода, мм	Производительность, г/с
		сила тока, А	напряжение дуги, В	расход газа, дм ³ /мин		
2,0	0,8	100	20...22	8...9	8...10	0,43
	1,0	110	19...20		10...12	0,41
3,0	1,0	150	21...22	9...10	10...12	0,82
	1,2	180	22...23		12...15	1,09
	1,4	200	21...22		14...16	0,98
4,0	1,2	200	22...23	10...12	12...15	0,99
	1,4	270	24...25		15...18	1,09
5,0...6,0	1,4	320	27...28	12...15	18...20	1,36
	1,6	280	27...29			1,44

Замковые соединения позволяют выполнять сварку первых проходов на больших токах, поскольку в данном случае отсутствует опасность прожога листов. При сварке замкнутых сосудов для исключения пор в корне шва требуется сборка без зазоров, поэтому детали собирают с натягом.

Вертикальные швы на металле толщиной до 6 мм и корневые швы при переменных зазорах сваривают сверху вниз углом назад. Металл толщиной до 3 мм сваривают без колебаний электрода, металл большей толщины — с поперечными колебаниями электрода. Скорости сварки сверху вниз обычно в 2...2,5 раза выше, чем при сварке снизу вверх.

Листы толщиной более 7 мм сваривают снизу вверх проволоками диаметром до 1,6 мм углом вперед или назад.

Горизонтальные швы соединений листов толщиной до 6 мм выполняют проволоками диаметром 0,8...1,4 мм. Соединения металла толщиной до 3 мм собирают без скоса кромок, а при большей толщине делают скос на кромке верхнего листа.

Потолочные швы рекомендуют выполнять проволокой диаметром 0,5...1,4 мм углом назад на минимальных напряжениях и токах. Сварку стыковых швов с разделкой ведут с поперечными колебаниями электрода. Металл толщиной более 6 мм сваривают в два и более прохода.

3.3.6. СВАРКА ПОРОШКОВЫМИ ПРОВОЛОКАМИ

Для сварки применяют проволоки без дополнительной защиты (самозащитные) или с дополнительной защитой углекислым газом. Для сварки в углекислом газе рекомендуют применять порошковые проволоки рутиловые и рутил-флюоритовые.

В зависимости от типа проволоки (рутил-органический, карбонатно-флюоритовый и др.) используют постоянный ток прямой или обратной полярности от источника с крутопадающей или жесткой внешней характеристикой.

Особенности процесса сварки. Конструкция порошковой проволоки определяет некоторые особенности ее плавления. Сердечник проволоки на 50...70% состоит из неметаллических, неэлектропроводных материалов, поэтому дуга горит на металлической оболочке. Компоненты сердечника могут частично переходить в сварочную ванну в нерасплавленном состоянии, что вызывает образование пор и неметаллических включений в металле шва.

Металлургические особенности процесса сварки порошковыми проволоками определяют повышенную склонность металла шва к образованию пор при отклонении напряжения дуги и вылета электрода от значений, рекомендуемых производителем.

Техника сварки. Подготовка кромок, их очистка и сборка под сварку осуществляются теми же способами, что и при других способах сварки. Прихватки выполняют покрытыми электродами или порошковой проволокой.

Техника сварки порошковыми проволоками мало отличается от сварки плавящимся электродом в защитных газах. Однако появление на поверхности сварочной ванны шлака, затекающего при некоторых условиях в зазор между кромками впереди шва, изменяет условия проплавления корня шва и может привести к непровару кромок. Необходимо следить за равномерным покрытием всей сварочной ванны шлаком. При многослойной сварке поверхность предыдущих швов рекомендуется тщательно очищать от шлака.

При сварке стыковых швов проволока должна быть перпендикулярна поверхности изделия или расположена углом назад с отклонением от вертикали до 15°. При сварке угловых швов «в лодочку» или наклонным электродом угол между электродом и поверхностью изделия должен быть 45...60°.

Проволоки рутил-органического типа имеют удовлетворительные технологические свойства, мало чувствительны к изменению напряжения дуги. Однако сварка на большом токе и при низком напряжении на повышенной скорости может привести к образованию в швах подрезов. Вылет электрода должен быть 15...20 мм.

Проволоки карбонатно-флюоритового типа требуют стабилизации напряжения дуги и более тщательной очистки кромок, чем проволоки рутил-органического типа. Для надежного возбуждения и горения дуги и предупреждения в швах пор вылет электрода должен устанавливаться в пределах 25...30 мм.

3.3.7. СВАРКА ТОЧЕЧНЫХ ШВОВ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

Точечные швы выполняют в любом пространственном положении вольфрамовым или плавящимся электродом в основном для получения нахлесточных соединений. Для предупреждения прожога в соединениях необходимо обеспечить плотное прилегание листов с зазором не более 0,5 мм, а с обратной стороны можно установить медные подкладки.

Размеры точки и ее свойства зависят главным образом от силы сварочного тока, напряжения и времени горения дуги.

При сварке вольфрамовым электродом используют сварочные пистолеты, конструкция которых позволяет поджечь верхний лист к нижнему. Хорошее качество точек достигают при толщине верхнего листа до 2 мм. Во избежание загрязнения рабочего конца электрода дугу возбуждают с помощью осциллятора. При увеличении сварочного тока и времени горения дуги глубина проплавления и диаметр точки увеличиваются. Для обеспечения хорошей защиты зоны сварки применяют различные типы газовых насадок. Время протекания сварочного тока регулируют с помощью реле. Образование подрезов, трещин и пор в точке предупреждают повторным кратковременным возбуждением дуги и плавным уменьшением тока.

При использовании плавящегося электрода точки сваривают в нижнем положении при толщине верхнего листа до 6 мм без отверстия, а в вертикальном и потолочном положениях ведут сварку с короткими замыканиями импульсно-дуговым способом. Размеры точек регулируют, изменяя силу сварочного тока и напряжение дуги, диаметр электрода и время горения дуги. Для увеличения размеров точки сварку можно выполнять с круговым перемещением электрода. Целесообразно вести сварку полуавтоматами с реле времени, регулирующими время подачи электродной проволоки. Для защиты следует использовать сопла, как и при обычной сварке, но с отверстиями для выхода газа. При соединении металла толщиной свыше 2 мм к концу сварки ток уменьшают и увеличивают напряжение дуги.

3.4. ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ

Электрошлаковая сварка — это сварка плавлением, при которой для нагрева используется тепло, выделяющееся при прохождении электрического тока через расплавленный шлак (рис. 3.25). В этом принципиальное отличие процесса ЭШС от дуговых способов сварки.

Наибольшее практическое применение имеет ЭШС проволочным электродом (одним или несколькими) с колебаниями или без колебаний, пластинчатым электродом большого сечения и плавящимся мундштуком (рис. 3.26). Электрошлаковую сварку применяют при выполнении прямолинейных, криволинейных и кольцевых швов. Минимальная толщина деталей, соединение которых возможно ЭШС, находится в пределах 25...30 мм. Экономически наиболее целесообразно использовать ЭШС при изготовлении толстостенных конструкций из низко- и среднеуглеродистых, низко-, средне- и высоколегированных сталей, чугуна и цветных металлов (алюминия, титана).

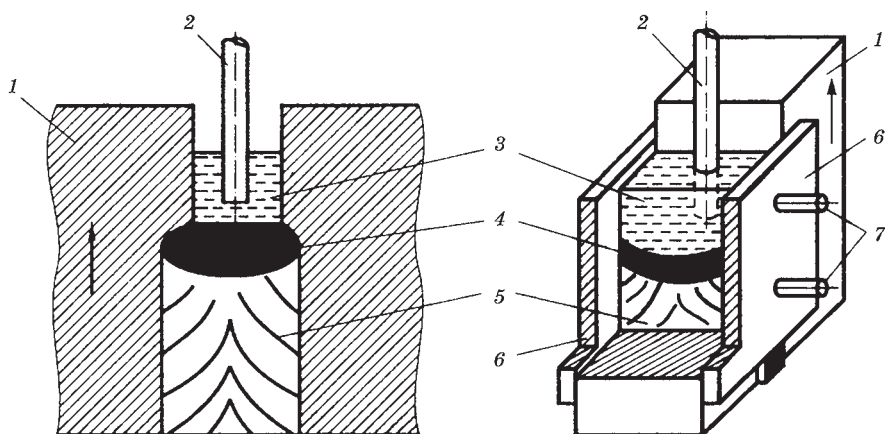


Рис. 3.25

Схема процесса электрошлаковой сварки:

1 — свариваемая деталь; 2 — электрод; 3 — расплавленный флюс; 4 — сварочная ванна; 5 — сварной шов; 6 — подвижные ползуны-кристаллизаторы; 7 — подвод охлаждающей воды; стрелками показано направление сварки.

3.4.1. ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПРОЦЕССА

Сущность процесса. При электрошлаковой сварке (ЭШС) сварочный ток проходит по электроду, жидкому шлаку, обладающему определенным электрическим сопротивлением, и основному металлу, обеспечивая выделение тепла для расплавления основного и присадочного металлов, а также флюса, поступающего в ванну. Слой расплавленного шлака за счет меньшей, чем у расплавленного металла, плотности находится в верхней части ванны, исключает воздействие воздуха на жидкий металл и очищает капли электродного металла, проходящие через шлак, от вредных примесей.

Для начала электрошлакового процесса необходимо расплавление флюса и образование шлаковой ванны. Применяют следующие способы создания шлаковой ванны: «твердый старт», когда сварочный флюс вначале плавится электрической дугой во входном кармане, и «жидкий старт», когда в карман заливают жидкий флюс, который предварительно расплавляют в электрической печи. Для более легкого возбуждения дуги на дно входного кармана засыпают металлический порошок, стружку, термитные смеси, а затем дуга шунтируется подсыпаемым и расплавляющимся флюсом.

Глубина шлаковой ванны может изменяться в пределах 35...60 мм. Температура шлаковой ванны около электрода — 1900...2000°C. Скорость плавления присадочного металла при электрошлаковой сварке больше, а расход флюса в 10...20 раз меньше, чем при дуговой сварке, и составляет около 5% расхода электродной проволоки. При ЭШС обеспечивается возможность получения за один проход сварных соединений теоретически любой толщины.

Электрошлаковые швы формируют с помощью водоохлаждаемых ползунов или медных подкладок, а также стальных подкладок или замковых соединений.

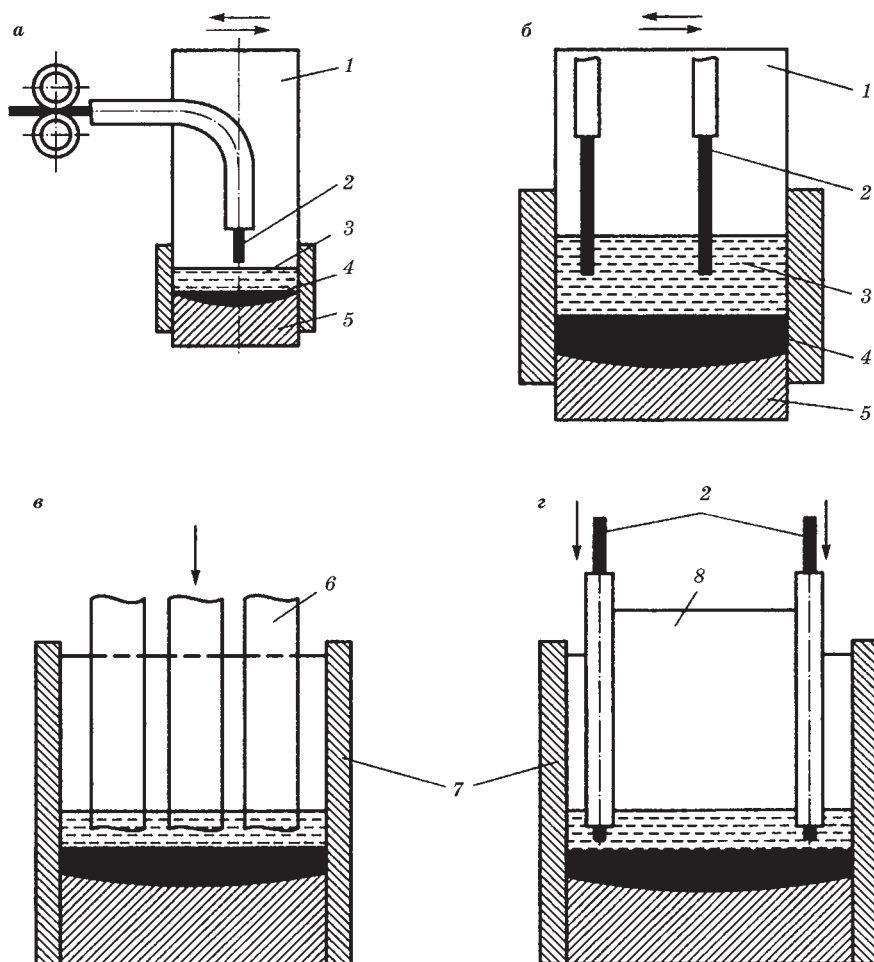


Рис. 3.26

Разновидности процесса электрошлаковой сварки:

а — одним проволочным электродом без колебаний или с колебаниями электрода; *б* — двумя проволочными электродами с колебаниями; *в* — пластинчатыми электродами; *г* — плавящимся мундштуком; 1 — свариваемая деталь; 2 — электронная проволока; 3 — ванна расплавленного флюса; 4 — расплавленный металл (основной и электродный); 5 — сварной шов; 6 — пластинчатый электрод; 7 — медные водоохлаждаемые ползуны или формирующие устройства; 8 — плавящийся мундштук; стрелками показаны направления колебаний и подачи электродов.

Шлаковая ванна в электрической сварочной цепи является нелинейным активным сопротивлением, что позволяет использовать для сварки источники с жесткой внешней характеристикой.

ЭШС за счет значительной тепловой инерции ванны характеризуется высокой устойчивостью процесса, мало зависящей от рода тока, кратковременных изменений силы тока и даже его прерывания. Процесс устойчив при плотностях тока $0,2...300 \text{ А/мм}^2$ и позволяет использовать проволочные электроды диаметром от 1,6 мм и пластинчатые электроды сечением от 400 мм^2 и более.

Основные недостатки электрошлаковой сварки. Сварку выполняют только в вертикальном или в близком к вертикальному положениях (отклонение от вертикали не более 30°). В случае вынужденной остановки сварной шов подвергают ремонту или полностью удаляют и вновь сваривают. Кроме того, необходимо изготавливать и устанавливать перед сваркой технологические детали (планки, «стартовые карманы», формирующие устройства и др.). Крупнозернистая структура в металле шва и зоне термического влияния и обусловленная этим низкая ударная вязкость металла сварного соединения при отрицательных температурах также ограничивают область применения ЭШС.

3.4.2. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ

Флюсы. Для выделения требуемого количества теплоты при электрошлаковой сварке флюсы должны обладать определенным электрическим сопротивлением в расплавленном состоянии, обеспечивать устойчивый электрошлаковый процесс в широком диапазоне напряжений и сварочных токов и удовлетворительное формирование поверхности шва.

Расплавленный флюс не должен вытекать в зазоры между кромками и формирующими шов устройствами и отжимать ползуны от свариваемых кромок.

Лучшими технологическими свойствами при сварке углеродистых и низколегированных сталей обладают плавные флюсы электропроводные в твердом и расплавленном состоянии. Флюс перед употреблением прокаливают в электрической печи при $300\ldots 700^\circ\text{C}$ в течение $1\ldots 2$ ч.

Электродные и присадочные материалы. При ЭШС в качестве электродов используют проволоку, пластины, трубы и ленты. В основном применяют проволоку сплошного сечения диаметром $1,6\ldots 6$ мм.

Химический состав электродного металла выбирают в соответствии с основным металлом и требованиями к служебным характеристикам металла шва. Лучшим вариантом считается такой, когда в качестве электродного металла применяют пластины или стержни, аналогичные по химическому составу основному металлу. При сварке плавящимся мундштуком металл шва легируют, дополнительно подавая проволоку соответствующего состава.

ЭШС иногда выполняют с подачей в шлаковую ванну специальных порошкообразных присадочных металлических материалов, а также стружки или стержней, по составу идентичных основному металлу.

Благодаря хорошему перемешиванию в ванне расплавленного металла, электрошлаковую сварку возможно вести несколькими электродами, различными по химическому составу, и получать заданный состав шва.

3.4.3. ТЕХНИКА ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ

Электрошлаковой сваркой могут быть выполнены стыковые, угловые и тавровые соединения с конфигурацией шва прямолинейной, кольцевой, переменного сечения, переменной кривизны. Наиболее распространены стыковые соединения. Угловые и тавровые соединения встречаются реже (рис. 3.27). Основные типы, конструктивные элементы и размеры сварных соединений при ЭШС сталей приведены в ГОСТ 15164-78.

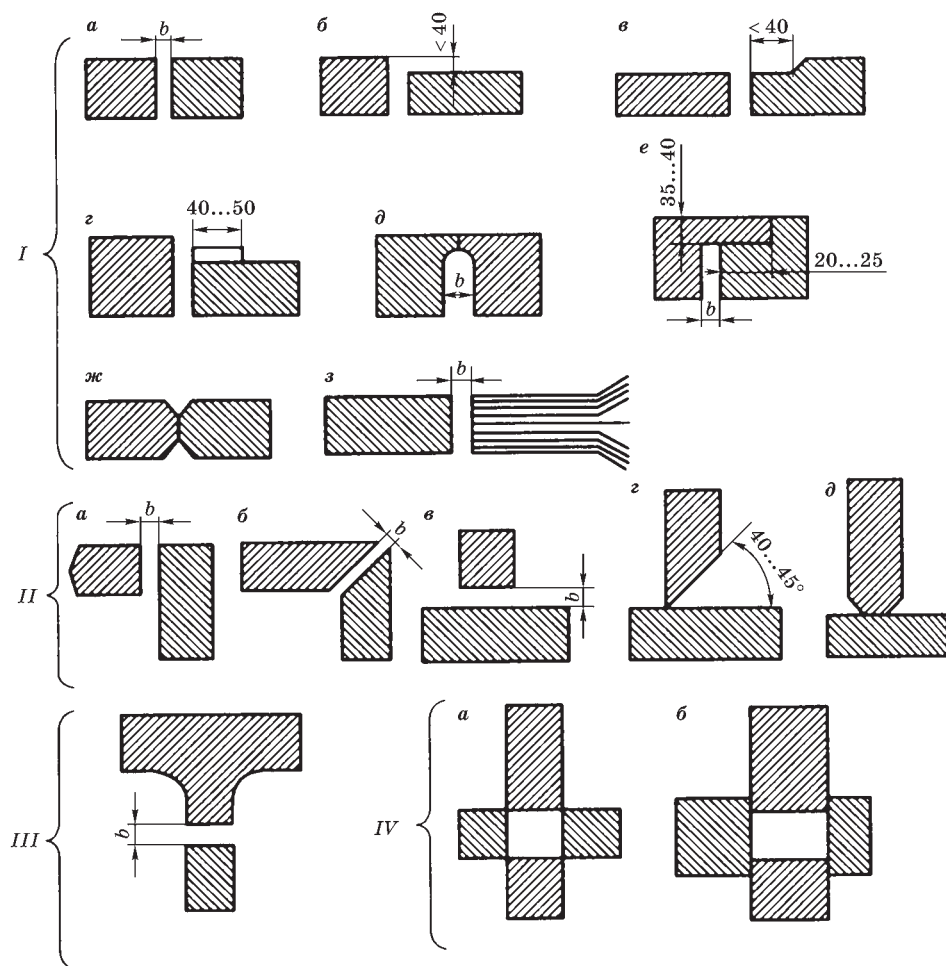


Рис. 3.27
Типы соединений, выполняемых ЭШС:

I — стыковые соединения: *a, б* — с равными и разными толщинами свариваемых кромок, *в* — с уменьшением одной кромки до размеров сопрягаемой, *г* — с увеличением толщины более тонкой кромки, *д* — с фигурной разделкой кромок, *е* — замковое соединение, *ж* — X-образное соединение, *з* — соединение монолитной детали с набором пластин; *II* — угловые и тавровые соединения с прямой и угловой разделкой кромок (*a–д*); *III* — соединения литых деталей; *IV* — крестообразные соединения.

Подготовка деталей к сварке. При ЭШС важны чистота обработки торцевых поверхностей свариваемых кромок и состояние боковых поверхностей кромок, по которым будут перемещаться устройства, формирующие шов. На металле толщиной до 200 мм торцевые поверхности кромок подготавливают газовой резкой. При большей толщине, а также для кольцевых швов и деталей из легированных сталей применяют механическую обработку. Боковые поверхности деталей зачищают наждачными кругами или механической обработкой на ширину 60...80 мм от торца кромок.

При сборке стыковых соединений прямолинейных швов смещение кромок не должно превышать 2...3 мм, а для кольцевых швов смещение кромок должно быть меньше.

Для получения точных размеров готового сварного изделия необходимо собирать детали с зазором, учитывающим деформации соединяемых деталей при

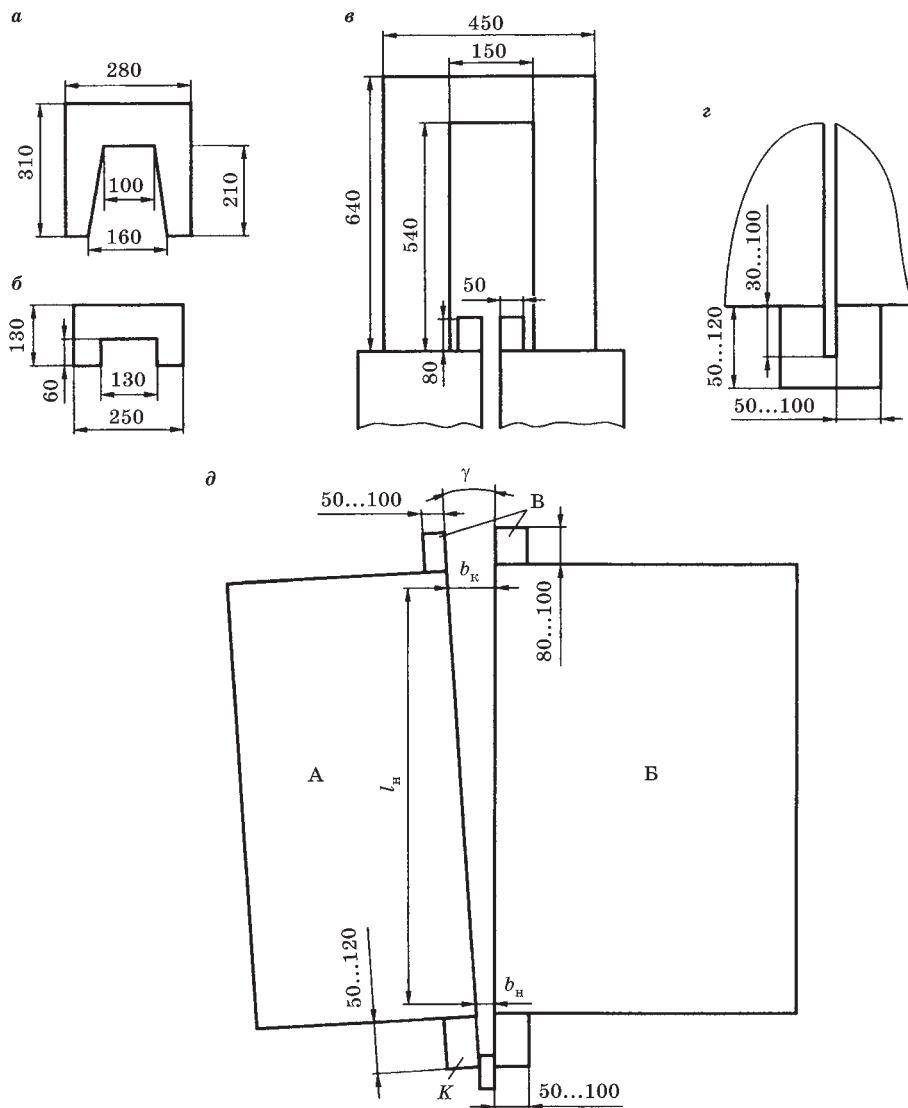


Рис. 3.28

Схемы сборочных приспособлений (а-г) и подготовка прямолинейного стыкового соединения (д) для электрошлаковой сварки:

а, б — сборочные скобы; в — концевая скоба и выводные планки; г — входной карман; А, Б — свариваемые детали; К — входной «карман»; В — выводные планки; b_n и b_k — начальный и конечный зазоры; γ — угол раскрытия зазора.

сварке. Сборочный зазор в нижней части стыка равен сварочному зазору. В верхней части стыка сборочный зазор увеличивают из расчета 2...4 мм на каждый метр длины стыка. В зависимости от вида материала, способа ЭШС, режима и условий закрепления, угол раскрытия деталей при сборке может достигать 1...2°.

Перед сваркой устанавливают закрепляющие устройства, которыми чаще всего служат скобы, привариваемые с тыльной стороны стыка, или пластины, привариваемые через 500...800 мм с лицевой стороны и удаляемые в процессе сварки (рис. 3.28а, б).

Для начала электрошлакового процесса и выведения сварочной ванны за пределы сварного соединения используют входной карман и выходные планки, которые приваривают так, чтобы шов заканчивался на 60...80 мм выше торцевой поверхности кромок (рис. 3.28в, г). После сварки перед термической обработкой входной карман и выводные планки срезают.

Сварка проволочными электродами. Электродная проволока диаметром 2...3 мм — наиболее распространенный тип электродов для ЭШС стыковых соединений толщиной до 500 мм. Соединения толщиной до 50 мм выполняют одним неподвижным электродом. При толщинах металла 50...150 мм — одним электродом с колебательным движением, 100...300 мм — двумя электродами и 150...450 мм — тремя электродами. Расстояние между электродами зависит от толщины деталей и обычно не превышает 160 мм. Скорость сварки при ЭШС сравнительно небольшая и колеблется в зависимости от толщины деталей и числа электродов в пределах 0,5...15 м/ч.

Скорость подачи электродной проволоки изменяется от 15 до 500 м/ч и определяется скоростью сварки, площадью сечения наплавленного металла и суммарной площадью электродных проволок. Сварочный ток на одном электроде при заданной скорости подачи проволоки выбирают в диапазоне 500...1500 А.

Параметры режима сварки, к которым относятся глубина шлаковой ванны (40...50 мм), сухой вылет электрода (60...80 мм), скорость поперечных колебаний электрода (≈ 40 м/ч) и длительность остановки электродов у ползунов (4...5 с), не зависят от толщины свариваемых деталей.

Напряжение на электродах выбирают в зависимости от толщины и материала свариваемых деталей в пределах 35...50 В. Начальное напряжение при «твердом старте» должно быть на 2...3 В выше выбранного для установившегося режима, что способствует ускорению перехода от дугового процесса к шлаковому.

Сварка плавящимся мундштуком. Плавящийся мундштук неподвижен в зазоре и представляет собой тонкостенную трубку или набор пластин толщиной 5 и 10 мм или стержней, снабженных каналами для подачи электродной проволоки (рис. 3.29). Форма плавящегося мундштука определяется конфигурацией свариваемого стыка, а материал должен быть подобен основному. Для изоляции плавящегося мундштука от кромок деталей используют таблетки из измельченного в порошок флюса, замешанного на жидком стекле, прокаленные при 600...700°C.

Каналы мундштука соединяют трубками с механизмом подачи электродной проволоки. Число электродов определяют из расчета: одна проволока на 50...70 мм толщины детали. Скорость подачи электрода должна быть в пределах 120...160 м/ч при сварке толщин металла более 100...150 мм.

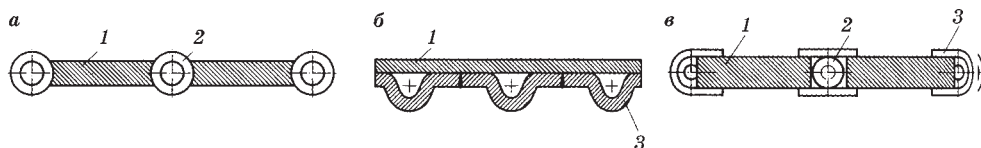


Рис. 3.29

Конструкция плавящихся мундштуков с направляющими из трубок (а), скоб (б) и комбинированными (в) направляющими:

1 — пластина; 2 — трубка; 3 — скоба для направления проволоки.

Сварочный ток выбирают в пределах 400...700 А на одну проволоку в зависимости от материала и толщины детали при напряжении 30...40 В и скорости сварки 0,6...1,0 м/ч для углеродистых и 0,4...0,6 м/ч для легированных сталей.

Ведение ЭПС, окончание сварки и все последующие операции выполняют по правилам сварки прямолинейных швов. При сварке толстого металла более 200 мм предпочтительнее выбрать трехфазную схему питания. Для надежного одновременного пуска всех проволок применяют заливку жидкого флюса в карман.

Сварка электродами большого сечения. Изделия толщиной до 200 мм сваривают одним пластинчатым электродом, изделия большей толщины — двумя или тремя электродами. Оптимальная толщина электродов 10...12 мм при зазоре между кромками 28...32 мм. Ширина электрода практически равна толщине свариваемого металла, при сварке двумя и тремя электродами зазор между ними — 12...16 мм.

Длину электрода выбирают, учитывая длину шва с входным карманом и выходными планками, сварочный зазор, толщину пластинчатого электрода и конструкцию зажима электрода, равную обычно 500...600 мм. Для сварки стыка длиной 1000 мм требуется электрод длиной 3600 мм, поэтому способ применяют для швов длиной не более 1500 мм.

Сварочный ток зависит от скорости сварки, скорости подачи пластины, толщины и ширины пластинчатого электрода, толщины свариваемого металла и устанавливается в пределах от 600 А до 2000 А на каждый электрод. Оптимальная скорость подачи пластинчатого электрода — 1,2...4,0 м/ч.

Сварка с порошкообразным присадочным металлом. В качестве присадки обычно используют металлическую крупку, близкую по составу свариваемому металлу, диаметром 1...2 мм. Отношение массы крупки к массе электродной проволоки может достигать единицы. Сварку ведут на стандартном сварочном оборудовании, укомплектованном приставками для дозирования и подачи крупки непосредственно в шлаковую ванну или на электрод за пределами сварочного зазора.

Холодная порошкообразная присадка уменьшает температуру перегрева металлической ванны и улучшает структуру и механические свойства соединения. Ударная вязкость при отрицательных температурах возрастает, что позволяет для некоторых низколегированных сталей отказаться от последующей нормализации. Поперечные деформации сварного соединения на 60...80% меньше, чем при обычной ЭПС. Достоинством способа является также повышение производительности процесса более чем в 2 раза.

Сварка с дозированной подачей мощности. Дозированную подачу мощности можно применять при ЭШС проволочным электродом, плавящимся мундштуком, электродами большого сечения. В процессе сварки при непрерывной подаче электрода периодически отключают источник сварочного тока, что позволяет уменьшить провар кромок, получить благоприятные условия кристаллизации металла шва, регулировать структуру металла сварного соединения. Применение дозированной мощности позволяет увеличить скорость сварки в 1,5...2 раза и получать сварные соединения сталей некоторых марок, не требующие термической обработки.

Сварка с принудительным охлаждением. Охлаждение поверхности шва и околошовной зоны водой используется для термоупрочняемых сталей. Спрейер укрепляют под ползуном с одной или двух сторон свариваемого шва. Спрейер состоит из двух камер: через верхнюю подается воздух для отсекаания пара, через нижнюю подается охлаждающая вода. Ширина зоны, охлаждаемой водой, — 130...140 мм. При сопутствующем охлаждении скорость сварки можно увеличить в 1,5...2 раза по сравнению с обычной ЭШС. Наиболее эффективен этот способ при сварке металла толщиной до 120 мм.

Сварка при увеличенном вылете проволоки. При ЭШС с обычным вылетом проволоки диаметром 3 мм нагревается у поверхности шлаковой ванны до 400...500°C, что обуславливает ее глубокое погружение (на 30...40 мм) в ванну для полного расплавления. Увеличивая сухой вылет до 180...220 мм, можно повысить нагрев проволоки сварочным током при подходе к шлаковой ванне до 1200°C и уменьшить необходимую для плавления глубину погружения в ванну до 16...18 мм. Процесс весьма устойчив даже при глубине ванны 20...25 мм. При этом сварочный ток уменьшается на 20...30%, напряжение сварки повышается на 4...5 В по сравнению с обычной сваркой, а скорость сварки возрастает в два-три раза.

Техника сварки электродами с повышенным вылетом обычная. Способ применяют для сварки металла толщиной до 300 мм.

Сварка кольцевых швов. Основной трудностью сварки кольцевых швов является необходимость замыкания шва. Форма линии замыкания кольцевого шва зависит от количества электродов и от толщины свариваемого металла. Кольцевые стыки толщиной до 150 мм сваривают одним электродом, толщиной 100...250 — двумя электродами и толщиной 150...450 мм — тремя электродами. Для формирования обратного валика применяют медное кольцо, охлаждаемое водой, остающиеся стальные подкладки (кольца шириной 80...100 и толщиной 25...30 мм) и обратные ползуны.

Предварительно стык вставляют входной карман и прихватывают прокладки для фиксации требуемой величины сборочного зазора. Собранные части дополнительно соединяют планками, приваренными равномерно по всей окружности кольцевого стыка, и укладывают на роликовые опоры.

Весь цикл сварки кольцевого шва делится на три этапа. Каждому этапу соответствует свой режим сварки. Скорость сварки кольцевого шва выбирают на 10–15% ниже скорости сварки прямолинейных швов при соответствующей толщине металла.

На первом этапе сваривают начальный участок шва при неподвижном аппарате и вращении изделия (рис. 3.30а, б). На втором этапе процесс сварки ведут

так же, как при сварке прямолинейных швов. После поворота изделия на $1/3$ окружности газовой резкой вырезают карман по шаблону и готовят данный участок к сварке замыкающего шва. На третьем этапе, когда прямолинейная часть начала шва займет вертикальное положение, вращение изделия прекращают и включают подъем аппарата (рис. 3.30в). После заварки вертикальной части замыкающего участка подъем аппарата прекращают и включают вращение изделия (рис. 3.30г), выводят из работы электрод, находящийся ближе к наружному краю стыка, и сварку заканчивают одним электродом.

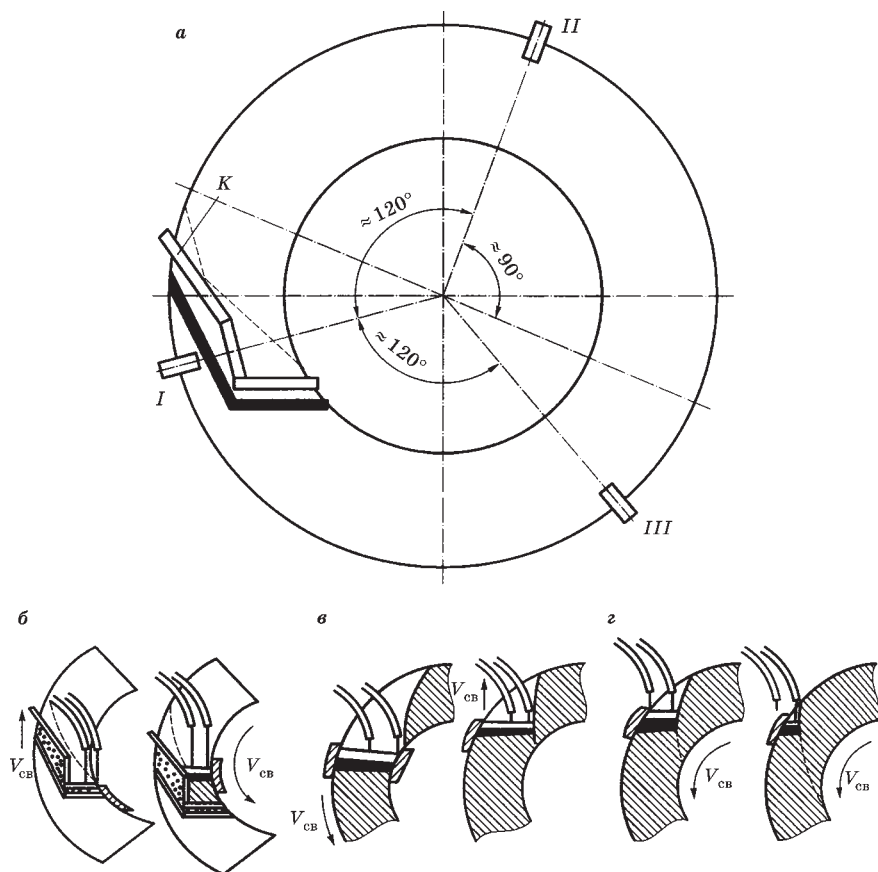


Рис. 3.30

Схема сборки (а) и процесса сварки кольцевого стыка в начальной (б) и замыкающей (в, г) частях шва:

I–III — точки контроля сборочного зазора; K — входной карман; $V_{св}$ — скорость сварки.

3.4.4. ОСОБЕННОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ИХ ТЕРМООБРАБОТКА

Для повышения ударной вязкости сварного соединения применяют ЭШС с пониженной погонной энергией, ЭШС с сопутствующим нагревом, а также последующую термическую обработку в интервале температур $750\text{--}950^\circ\text{C}$.

Одной из основных причин необходимости термической обработки сварных соединений, выполняемых электрошлаковой сваркой, особенно при толщинах металла более 500 мм, является устранение высоких остаточных трехосных напряжений, образующихся в результате сварки.

Наиболее распространенные дефекты при ЭШС — это горячие трещины в металле шва, а в околошовной зоне — отколы. Встречаются также шлаковые включения и непровары.

Для обеспечения высокой стойкости металла шва к образованию горячих трещин корректируют состав электродного металла или скорость подачи электродной проволоки. Изменение направления кристаллизации, которое зависит от коэффициента формы ванны, также уменьшает вероятность образования горячих трещин. Увеличение коэффициента формы и повышение стойкости против образования трещин происходит при уменьшении сварочного тока и скорости сварки, а также при повышении напряжения и увеличении зазора.

Для предупреждения отколов применяют предварительный подогрев начального участка или всего шва до температуры 150–200°C, уменьшают скорость сварки или используют высокий отпуск сразу же после сварки.

Образование пор при ЭШС может быть вызвано окалиной на кромках изделия, большой влажностью и загрязненностью флюса, снижением в металле шва содержания марганца и кремния при применении несоответствующих электродных проволок и флюсов.

Шлаковые включения и непровары при ЭШС обычно связаны с нарушениями режима сварки. Непровары обычно являются следствием низкого напряжения сварки.

3.5. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

3.5.1. ПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА

Сущность процесса. Это сварка плавлением, при которой нагрев проводится сжатой дугой. Если принудительно сжать дугу, то ее температура значительно повысится. Это обеспечивают подачей плазмообразующего газа в камеру 1 горелки, который выходит через узкое сопло 4 и сжимает дугу (рис. 3.31). Часть газа, проходя через столб дуги, нагревается, ионизируется и выходит из сопла в виде плазменной струи. Наружный слой газа, окружающий столб дуги, остается относительно холодным и создает электрическую и тепловую изоляцию между дугой и соплом, предохраняя его от разрушения. В связи с высокой скоростью истечения высокотемпературной плазменной струи часто нужна дополнительная защита зоны сварки газом, подводимым через газовое сопло 5.

Если дуга горит между электродом 2 (катод) и изделием 3 (анод), то это — плазменная струя прямого действия (рис. 3.31а). Когда (рис. 3.31б) дуга горит между электродом 2 и соплом 4, а нагретый и ионизированный газовый поток выдувается из сопла горелки — это плазменная струя косвенного действия.

В горелках прямого действия непосредственное возбуждение дуги между электродом и изделием через узкий канал сопла осуществить трудно. Поэтому

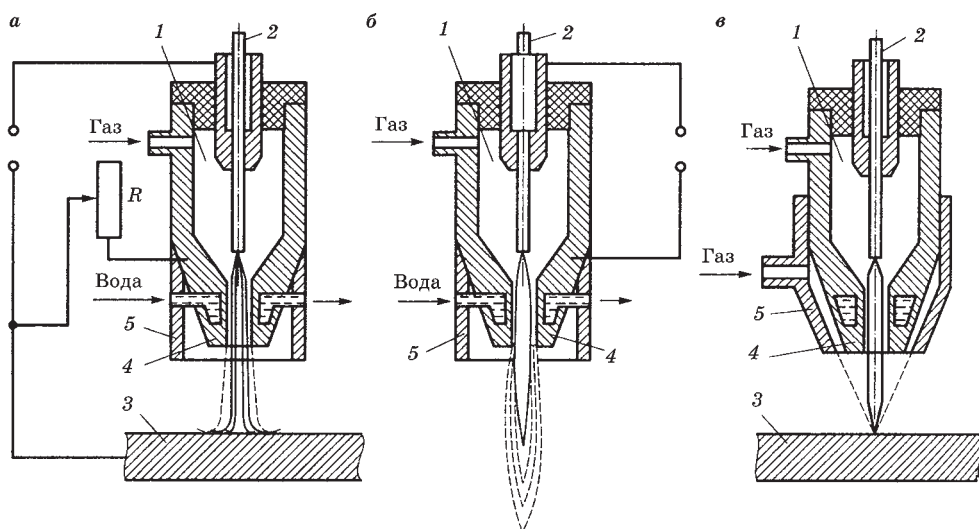


Рис. 3.31
Схемы горелок для плазменной сварки:

а — прямого действия; *б* — косвенного действия; *в* — с вторичным фокусирующим и защитным потоком газа; 1 — камера горелки; 2 — катод; 3 — изделие (анод); 4, 5 — сопла; *R* — резистор.

при помощи осциллятора возбуждается вспомогательная дуга между электродом и соплом, которая питается от того же источника питания *б*, через ограничивающее сопротивление *R*, а затем, как только разогретая струя коснется изделия, автоматически зажигается основная дуга и выключается вспомогательная.

Параметры режима. Обычно при плазменной сварке диапазон применяемых токов — от 30 до 300 А при напряжении 17...35 В и скорости сварки 10...50 м/ч. Важными параметрами являются расход плазмообразующего (1,5...5 л/мин) и защитного газа (3...10 л/мин), а также диаметр (2,5...5 мм) и длина канала сопла (1...3 мм). Расход и состав рабочего газа в значительной мере влияют на напряжение и температуру дуги. Чем интенсивнее обжата дуга, тем выше ее напряжение, и тем выше эффективная тепловая мощность и давление дуги, и больше глубина проплавления. Таким образом, напряжение сжатой дуги зависит от конструктивных размеров элементов плазмотрона: диаметра и длины сопла, расстояния между электродом и соплом. Расстояние от торца сопла до изделия в диапазоне 4...8 мм мало влияет на глубину проплавления.

Вольт-амперная характеристика плазменной дуги при прочих равных условиях имеет такую же конфигурацию, как и характеристика обычной дуги, но с увеличением обжатия меньше сила тока, при которой вольт-амперная характеристика дуги переходит в горизонтальную или даже возрастающую. Поэтому при плазменной сварке оптимальными внешними характеристиками источника питания являются крутопадающие или даже вертикальные характеристики, позволяющие значительно изменять напряжение при постоянстве силы тока.

Техника сварки. При плазменной сварке применяют переменный или постоянный ток прямой и обратной полярности, а также импульсный режим

изменения сварочного тока и различный состав плазмообразующей среды: аргон, гелий, азот, водород и их смеси. Сваривают стыковые и угловые швы. Сварку осуществляют как проникающей на всю толщину соединяемого металла, так и непроникающей плазменной струей. Для предупреждения прожогов применяют съемные подкладки с канавкой для получения заданной формы обратного валика и защиты газом обратной стороны шва.

Стыковые соединения металла толщиной до 2 мм можно выполнять с отбортовкой кромок. Металл толщиной до 3 мм сваривают обычно непроникающей струей с присадочным металлом или без него. Большая глубина проплавления позволяет сваривать без скоса кромок металл толщиной до 15 мм, однако при толщинах 10...12 мм ухудшается стабильность формирования шва, поэтому при большей толщине рекомендуют делать скос кромок и использовать дополнительный присадочный металл. Обычно процесс ведут со сквозным проплавлением и выходом плазменной струи с обратной стороны шва.

Разновидности плазменной сварки. *Сварка закрытой сжатой дугой* осуществляется в микрокамере, охлаждаемой водой и защищающей зону плавления от воздуха. Присадочная проволока подается в зону плавления через специальное отверстие в микрокамере. В процессе сварки тонких металлов микрокамеру поджимают к свариваемым кромкам с силой, достаточной для устранения коробления кромок. Этот способ используют для сварки металлов толщиной 0,1...15 мм.

Сварка двойной плазменной дугой, возбуждаемой между электродом горелки и изделием и подаваемой в зону сварки токоведущей присадочной проволокой. Первая дуга осуществляет подогрев изделия, а вторая — плавление присадочной проволоки. Способ применяют для сварки соединений с разделкой кромок.

Сварка плавящимся электродом происходит при подаче плавящейся электродной проволоки по оси горелки через медное сопло в плазменную струю, образующуюся между вольфрамовым электродом и изделием. Способ является комбинацией плазменной сварки и дуговой сварки плавящимся электродом.

Сварка в вакууме полым неплавящимся катодом осуществляется в камере при давлении $1...1 \times 10^{-2}$ Па и расходе аргона, подаваемого через отверстие в катод, $2...4$ дм³/ч. Способ применяют при сварке тугоплавких и активных металлов толщиной 1...20 мм.

Микроплазменная сварка применяется для соединения изделий толщиной 0,025...0,8 мм. Устойчивый процесс сварки при токах 0,2...15 А обеспечивается за счет высокой степени сжатия плазменной струи в канале диаметром менее 1 мм. Плазмообразующий газ — аргон, а защитные газы — аргон, гелий, азот, водород и их смеси с аргоном. Процесс обеспечивает получение узкого шва и малой зоны термического влияния, что уменьшает деформацию изделий.

3.5.2. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА

Сущность процесса. Это сварка плавлением, при которой для нагрева используется энергия ускоренных электронов. Сварку производят в специальной камере в глубоком вакууме (остаточное давление 13 мПа) электронным лучом, который представляет собой сфокусированный поток

электронов, движущихся с высокими скоростями. Электроны излучает нагретый вольфрамовый или металлокерамический катод, установленный в специальной электронной пушке. Ускорение движения электронов обусловлено постоянным высоким напряжением (до 100 кВ) между катодом и анодом (изделием).

Поток электронов фокусируется магнитной линзой в узкий луч и направляется в место соединения деталей. Энергия, необходимая для нагрева и плавления металла, выделяется в результате интенсивной бомбардировки места сварки быстро движущимися электронами.

В соответствии с технологическими признаками классификации различают сварку без колебаний и с колебаниями электронного луча. Для регулирования вводимой в изделие теплоты сварку ведут остросфокусированным или расфокусированным лучом. Электронным лучом осуществляют сварку тугоплавких и химически активных металлов, выполняют узкие и глубокие швы с малыми остаточными деформациями на деталях больших толщин (до 70 мм и даже более).

Основные параметры режима. Наиболее важными технологическими параметрами электронного пучка при сварке являются ускоряющее напряжение (25...120 кВт), мощность (1...120 кВт), угол сходимости луча (1...5°), сила тока луча (40...500 мА) и скорость сварки (3...100 м/ч).

Главное влияние на качество шва оказывают мощность пучка, положение его минимального сечения относительно поверхности свариваемых деталей и скорость сварки. Стабильность положения фокуса пучка обеспечивает равномерность глубины проплавления, а скорость сварки определяет форму шва, размеры зоны термического влияния и, как следствие, сопротивляемость образованию трещин и величину деформаций. С увеличением толщины свариваемых деталей от 1,5 до 150 мм скорость сварки должна быть снижена с 200 до 3 м/ч для получения качественного сварного соединения.

Техника сварки. Электронно-лучевую сварку применяют для получения стыковых, угловых и тавровых соединений в нижнем и вертикальном положении на подъем, а также горизонтальных швов на вертикальной плоскости. Сварку в нижнем положении выполняют вертикальным электронным пучком без подкладок или с применением подкладок для формирования обратной стороны шва при толщине соединяемых деталей до 80 мм. Горизонтальные швы и вертикальные на подъем выполняют горизонтальным пучком без подкладок для металла любой толщины. Для получения качественных соединений необходима тщательная очистка кромок стыка и прилегающих внешних и внутренних поверхностей деталей. Возможна также дополнительная очистка в камере непосредственно перед сваркой маломощным сканирующим пучком электронов.

При электронно-лучевой сварке не требуется разделка кромок, но предъявляются жесткие требования к зазору в стыке, который в большинстве случаев не должен превышать 0,3 мм.

Основные технологические приемы при сварке. Для получения заданной формы шва, свойств сварного соединения и повышения производительности процесса сварки применяют различные технологические приемы, некоторые из них рассмотрены ниже.

Полное проплавление свариваемого стыка с образованием сквозного парогазового канала применяют в нижнем (при толщине металла до 40 мм) и в горизонтальном (при толщине до 400 мм) положениях для уменьшения угловых деформаций изделий и снижения вероятности образования пористости.

Развертка электронного пучка с амплитудой примерно равной диаметру пучка и частотой до 2 кГц в продольном и поперечном направлениях или по окружности, эллипсу и дуге позволяет увеличить диаметр и устойчивость канала, стабилизировать проплавление и снизить склонность к образованию трещин и полостей в корне шва.

Сварка наклонным электронным пучком (углом вперед) с отклонением на 5...7° в направлении движения улучшает условия плавления и кристаллизации металла в нижнем и вертикальном на подъем положениях и способствует лучшему удалению газов из расплавленного металла.

Модуляция тока в электронном пучке с частотой импульсов 1...100 Гц используется при сварке листовых конструкций толщиной до 1 мм для предотвращения образования трещин и уменьшения тепловложения.

Сварка с присадочным материалом наиболее часто используется при повышенных зазорах в стыке и исправлении дефектов шва. Сварку ведут с подачей проволоки диаметром 0,8...1,6 мм в хвостовую часть ванны под углом 15...45° к оси электронного пучка. Кроме того, в зазор между свариваемыми деталями могут помещать различные материалы в виде ленты, гранул или порошка для легирования металла шва, толщина слоя которых должна быть равна диаметру электронного пучка.

3.5.3. ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА

Сущность процесса. Это сварка плавлением, при которой для нагрева используется энергия излучения лазера (название по первым буквам английской фразы, которая в переводе означает: усиление света посредством стимулированного излучения).

В соответствии с *технологическими признаками* классификации по виду источников света относится к *световой сварке* в числе других (солнечная и искусственными источниками света). Излучение лазера может быть сфокусировано в пятно диаметром несколько микрометров, что обеспечивает концентрацию энергии, в десятки раз превышающую концентрацию других сварочных источников. Для сварки используют газовые и твердотельные лазеры. Газовые лазеры дают непрерывное излучение, а твердотельные — непрерывное или импульсное.

Современные промышленные лазеры применяют для сварки, резки, наплавки, поверхностной обработки, прошивки отверстий и других видов обработки различных конструкционных материалов во многих специальных отраслях машиностроения.

Вакуум при сварке лазером не нужен, и ее можно выполнять на воздухе, в аргоне, гелии или углекислом газе даже на значительном расстоянии от генератора излучения.

Основные параметры режима. Основными параметрами луча лазера являются мощность, длительность импульса, диаметр светового пятна и положение

фокуса относительно свариваемой поверхности. Количество световой энергии, поглощенной основным металлом, зависит от шероховатости и отражательной способности поверхности, которыми определяют потери энергии вследствие отражения светового потока.

Сварку деталей малых толщин до 1 мм выполняют в импульсном и непрерывном режимах. При этом плотность мощности выбирают в диапазоне $10^5 \dots 10^6$ Вт/см², а диаметр сфокусированного луча — от 0,05 до 1,0 мм. Скорость сварки в импульсном режиме определяется диаметром точки (диаметр сфокусированного луча), коэффициентом перекрытия (0,3...0,9) и частотой импульсов и может достигать 20 м/ч при частоте импульсов до 20 Гц.

При сварке с глубоким проплавлением основными параметрами режима являются мощность лазерного излучения, скорость сварки и параметры фокусирующей системы. Лазерное излучение фокусируется в пятно диаметром 0,5...1,0 мм и при мощности, выбранной из условия 1 кВт на 1 мм толщины металла, скорость при сварке сталей толщиной до 5 мм может достигать 100 м/ч.

Из параметров фокусирующей системы наиболее значимыми являются фокусное расстояние (обычно 120...150 мм) и положение фокальной плоскости относительно поверхности свариваемых деталей. Максимальная глубина проплавления достигается при расположении фокуса под поверхностью детали на глубине, зависящей от толщины и состава свариваемого материала (для стали от 1,0 до 1,5 мм).

Технологические приемы при сварке лазером. *Сварка с присадочным материалом* в виде проволоки диаметром до 1,0 мм, ленты или порошков позволяет регулировать химический состав и геометрические размеры шва. Проволоку подают в сварочную ванну, а порошки могут наноситься на поверхность свариваемых кромок напылением или обмазкой.

Осциллирование сфокусированного лазерного излучения по передней стенке канала проплавления увеличивает глубину проникновения в материал и, следовательно, примерно на 40% повышает глубину проплавления при непрерывном излучении. Для этого используют сканирование фокусирующей системы с частотой до 150 Гц и амплитудой колебаний, равной толщине свариваемых деталей.

Сварка на импульсно-периодическом режиме при частоте импульсов 0,4...1,0 кГц и длительности 20...50 мс позволяет увеличивать глубину проплавления в 3...4 раза по сравнению с непрерывным режимом, но для получения качественного шва требуется точное наведение луча на стык и существенное снижение скорости сварки.

Сварка с дополнительным непрерывным или импульсным потоком газа, подаваемым непосредственно в зону сварки под определенным давлением, обеспечивает повышение глубины проплавления на 30...40% и значительную ее стабилизацию, в особенности при несквозном проплавлении. Оптимальная величина давления и частоты импульсов подачи газа зависит от мощности излучения, скорости сварки и свойств материала.

Сварка совмещенным лазерным и дуговым источником теплоты обеспечивает суммарный эффект, превышающий эффективность каждого источника в отдельности, и при мощности дуги, сопоставимой с мощностью лазерного излучения, скорость сварки можно увеличить в несколько раз.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем сущность ручной дуговой сварки покрытыми электродами?
2. Какова техника выполнения швов при ручной сварке?
3. Как повышают производительность ручной дуговой сварки?
4. В чем сущность дуговой сварки под флюсом?
5. Какие особенности формирования швов при сварке под флюсом?
6. Какие основные разновидности сварки под флюсом?
7. В чем сущность дуговой сварки в защитных газах?
8. Какие основные особенности сварки в инертных и активных газах?
9. В чем особенность электрошлакового процесса сварки?
10. Какие основные разновидности процесса электрошлаковой сварки?
11. В чем сущность плазменной сварки?
12. Какие параметры определяют свойства плазменной струи?
13. В чем отличие электронно-лучевой и лазерной сварки?
14. Какова техника выполнения швов при электронно-лучевой сварке?
15. Какие технологические приемы используют при лазерной сварке?

4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Качество сварного шва зависит не только от применяемых сварочных материалов. При ручной и механизированной сварке оно во многом определяется искусством сварщика. При автоматической сварке — от точности выдерживания параметров режима сварки: сварочного тока, скорости сварки, скорости подачи электрода, направления электрода по стыку и др.

При автоматических и механизированных способах сварки помимо источников питания дуги необходимо иметь специальное оборудование (манипуляторы и механизмы перемещения сварочного источника теплоты), позволяющее механизировать выполнение двух основных технологических движений: подачу электрода в зону сварки и перемещение дуги вдоль свариваемых кромок.

Если при сварочном процессе оба эти движения механизированы, то такой процесс называют *автоматической сваркой*. Если подача электрода в зону сварки осуществляется механизированным способом, а перемещение дуги вдоль свариваемых кромок осуществляется вручную, то это — *механизированная сварка*.

К манипуляторам и механизмам перемещения сварочного источника теплоты предъявляют жесткие требования по точности установки свариваемых изделий и стабильности режимов сварки. Например, при сварке под флюсом и при аргонодуговой сварке тонколистовых металлов допускаются колебания скорости перемещения $\pm 5\%$ и $\pm 2\%$ соответственно. Отклонение положения стыка от оси дуги при сварке не должно превышать 25% диаметра пятна ввода теплоты в изделие.

Конструкции сварочных установок имеют устройства для защиты персонала от вредного воздействия процесса сварки. В качестве примера можно указать на наличие устройств отсоса вредных газов, образующихся при сварке; экранов и щитков, предохраняющих персонал от интенсивного ультрафиолетового и светового излучения при дуговой или плазменной сварке.

Сварочное оборудование разработано для всех основных видов сварки: покрытыми электродами, под флюсом, плавящимся и неплавящимся электродом в защитных газах, электрошлаковой и плазменной сварки.

4.2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ

4.2.1. ОБОРУДОВАНИЕ СВАРОЧНОГО ПОСТА

В зависимости от выполняемой работы, габаритов свариваемых изделий и характера производства, рабочее место сварщика может быть расположено непосредственно у свариваемого изделия или в специальных кабинах. Рабочее место сварщика непосредственно у свариваемого изделия организуют при сварке изделий больших размеров. Это, как правило, передвижное рабочее место, огражденное переносными щитами. Сварочный пост на постоянных местах оборудуют в специальных кабинах при сварке изделий небольших габаритов. Переносные щиты и кабины для сварщиков служат также для защиты рядом работающих сварщиков и других рабочих от излучения электрической дуги.

Сварочные кабины для одного сварщика имеют размеры 2000×2000 или 2000×3000 мм (рис. 4.1). Стены кабин изготавливают из негорючих материалов и окрашивают огнестойкой краской, поглощающей ультрафиолетовые лучи. Они имеют высоту 1800–2000 мм, а для лучшей вентиляции подняты над полом на 200–300 мм. Дверной проем в кабине закрывают брезентом,

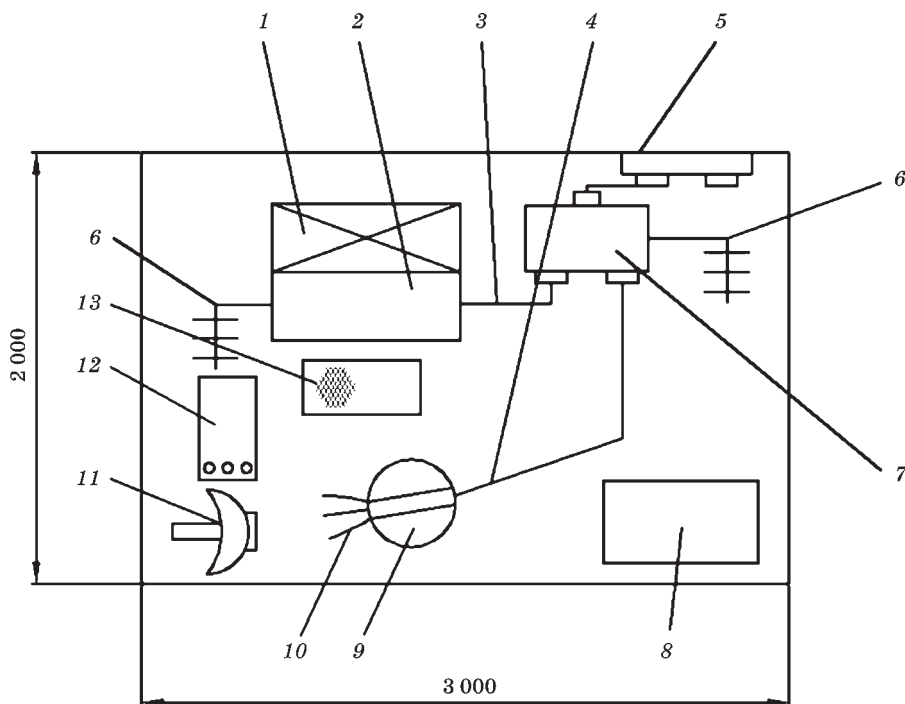


Рис. 4.1
Планировка сварочной кабины:

1 — вентиляция; 2 — стол; 3 — обратный провод; 4 — прямой провод; 5 — пускатель источника питания дуги; 6 — заземление; 7 — источник питания дуги; 8 — ящик для отходов; 9 — стул; 10 — коврик; 11 — щиток; 12 — электроды; 13 — коврик.

пропитанным огнестойким составом. Полы в кабинах настилают из огнеупорного материала. Кабины освещают дневным или искусственным светом (80–100 лк), вентилируют (воздухообмен 40 м³/ч) и снабжают местными отсосами газов и паров из зоны сварки.

Внутри кабины устанавливают металлический сварочный стол с болтами для крепления токоподводящего провода от источника сварочного тока и провода заземления стола. Сбоку стола имеются гнезда для хранения электродов или присадочной проволоки.

4.2.2. ЭЛЕКТРОДОДЕРЖАТЕЛИ ДЛЯ СВАРКИ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Основной инструмент при ручной дуговой сварке — электрододержатель. Основные параметры и технические требования, предъявляемые к электрододержателям, маркировка, методы испытания их установлены ГОСТ 14651-78 (в ред. 1989 г.). Конструкция электрододержателя должна обеспечивать замену электрода в течение не более 4 с и закрепление электрода в одной плоскости не менее чем в двух положениях — перпендикулярно и под углом, — а также надежное присоединение многожильных кабелей с медными жилами.

Электрододержатели пассатижного типа (рис. 4.2а), предназначены для сварки и наплавки швов во всех пространственных положениях. Электрод зажат между токоподводящей губкой 5 и рычагом 3. Усилие зажима электрода создается пружиной 2, защищенной пластмассовыми колпачками 1. Удаление огарка и замена его новым электродом производится при нажатии на рычаг 3. Изоляция обеспечивается теплостойкими пластмассовыми деталями 4.

Электрододержатели с рычажным зажимом (рис. 4.2б) предназначены для работы в нижнем и вертикальном положениях. Электрод зажимается под углом 70° к продольной оси электрододержателя между рычагом 1 и токоподводящим наконечником 2 с помощью толкателя 3, перемещаемого в осевом направлении при вращении рукоятки 4. Изоляция выполнена из теплостойких пластмассовых деталей.

Электрододержатели винтового типа (рис. 4.2в) применяют в нижнем и вертикальном положениях. Электрод зажимается под углом 70° к продольной оси электрододержателя между ползуном 2 и токоподводом 3. Электрододержатели изолированы с помощью теплостойких пластмассовых деталей: колпачка 1, накладки 4 и рукоятки 6. Соединение сварочного кабеля с электрододержателем — неразъемное и выполняется опрессовкой кабеля в токоподводе 3. Радиатор 5 предотвращает перегрев рукоятки электрододержателя.

Электрододержатели защелочного типа (рис. 4.2г) используют в нижнем и вертикальном положениях. Устройство для крепления электродов снабжено поворотной втулкой с фигурными выступами, которая вращаясь вместе с муфтой 1 воздействует на прижимной стержень 2. Поворачивая муфту 1 в любую сторону, можно зажимать электрод и освобождать его огарок. Сварочный кабель прикреплен к электрододержателю с помощью специальных винтов.

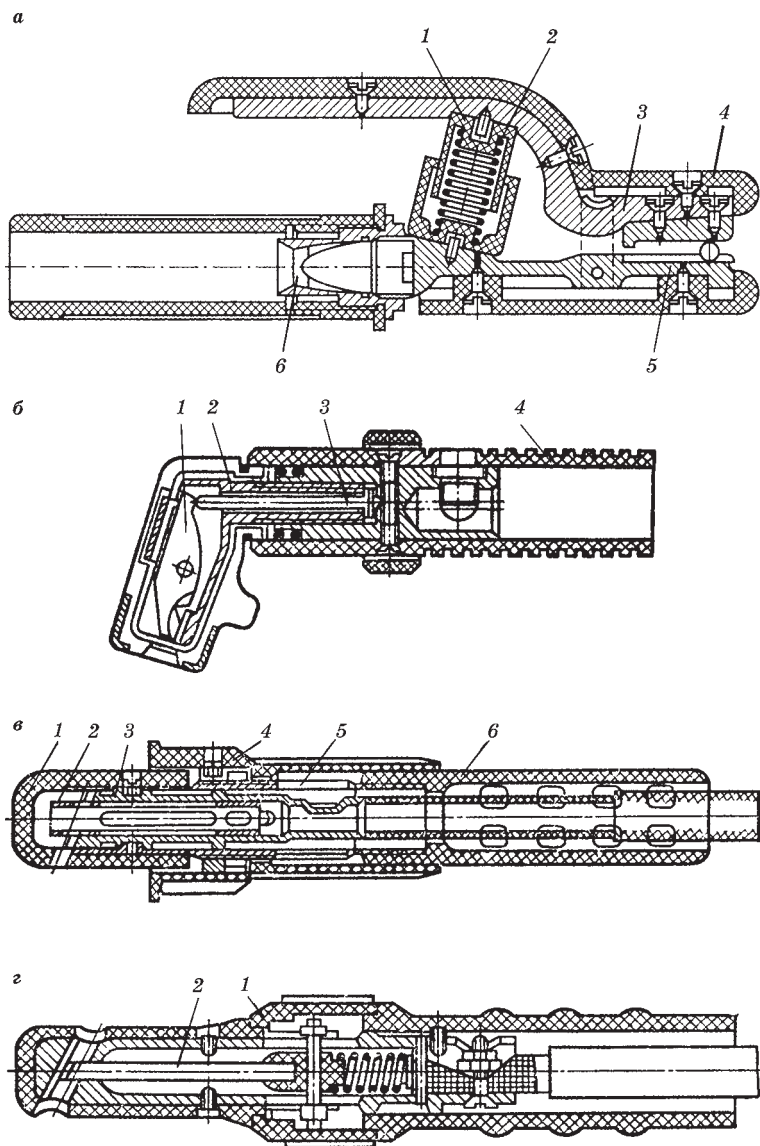


Рис. 4.2

Электрододержатели различных конструкций:

а — электрододержатель пассатижного типа; *б* — электрододержатели с рычажным зажимом; *в* — электрододержатель винтового типа; *г* — электрододержатель защелочного типа.

4.2.3. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

Ручные горелки для неплавящегося электрода имеют держатель молоткового типа с постоянным или переменным углом наклона. Горелка позволяет выполнять сварку изделий в любом пространственном положении

с присадочной проволокой и без нее на постоянном и переменном токе, и снабжена кнопками включения-выключения процесса сварки, а в некоторых случаях — рукоятками регулирования параметрами режима сварки. Для закрепления вольфрамового электрода и подвода тока к нему применяют цанговые зажимы. Существуют также конструкции с винтовым поджимом вольфрамового электрода. Такая конструкция более проста, не нуждается в сменных цангах, но не обеспечивает достаточной надежности токоподвода.

Горелка оснащена керамическими соплами, имеющими коническую камеру на входе газа и цилиндрический канал на выходе. Длина начального участка газовой струи, осуществляющего защитные функции, для такой конструкции сопла приблизительно равна внутреннему диаметру цилиндрического канала. Это позволяет производить сварку при выдвигании вольфрамового электрода из сопла на расстояние 4–10 мм. В большинстве конструкций горелок газ вводится в сопло через 8–16 каналов диаметром 1–2 мм.

Теплота, выделяющаяся на неплавящемся электроде, отводится либо корпусом горелки, либо охлаждающей жидкостью (часто водой) или защитным газом.

По конструкции горелка для ручной сварки должна быть легкой и удобной, в том числе и для сварки в труднодоступных местах. Горелки для ручной сварки выпускаются на токи до 500 А и, как правило, имеют водяное охлаждение. Горелки с естественным воздушным охлаждением выпускаются на токи до 150 А. На рисунке 4.3 приведен пример горелки с водяным охлаждением и совмещенным подводом тока и охлаждающей воды.

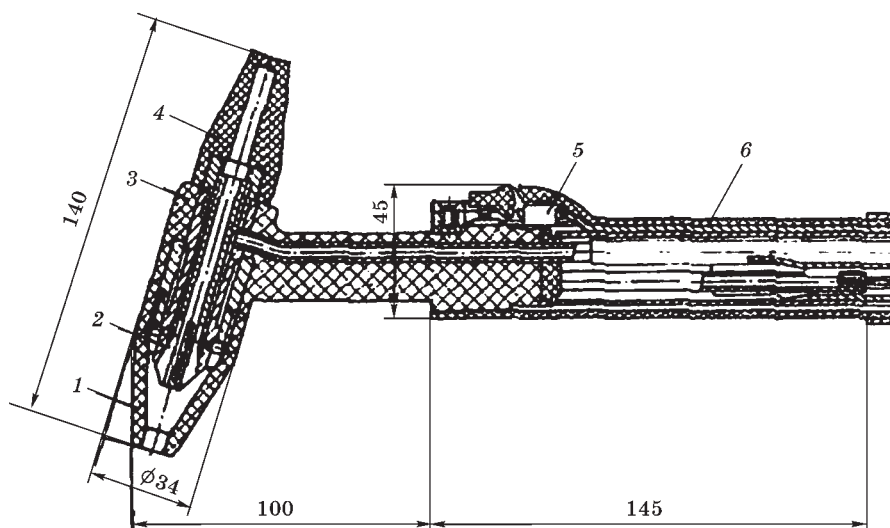


Рис. 4.3
Горелка для ручной дуговой сварки неплавящимся электродом

Оборудование для ручной дуговой сварки неплавящимся электродом помимо горелки содержит источник сварочного тока и газовую аппаратуру. К такому оборудованию относятся установки для ручной сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов. Установки снабжены горелками и оснащены

блоком регулирования цикла сварки, обеспечивающим контактное зажигание дуги на малом токе, автоматическое нарастание сварочного тока до заданного, регулировку амплитуд и длительностей тока импульса и паузы при сварке пульсирующей дугой, плавное снижение тока и продувку газа в конце сварки.

Применяются установки для ручной сварки на переменном токе алюминиевых сплавов, цветных металлов и легированных сталей. Установки обеспечивают компенсацию постоянной составляющей сварочной цепи, плавную регулировку сварочного тока, заварку кратера. Для увеличения радиуса действия имеется съемный переносной блок поджигания дуги, в котором размещены: газовый клапан, возбудитель-стабилизатор дуги и дистанционный регулятор сварочного тока.

4.3. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ И МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ

4.3.1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ СВАРОЧНЫХ АВТОМАТОВ И ПОЛУАВТОМАТОВ

При сварке плавящимся электродом постоянство длины дуги обеспечивается при равенстве скорости подачи электродной проволоки в зону сварки V_s и скорости ее расплавления V_{π} .

Нарушение равенства скоростей восстанавливается за счет саморегулирования дуги при использовании источников питания с жесткой (пологопадающей) внешней характеристикой. С учетом процесса саморегулирования дуги разработаны сварочные автоматы, работающие с постоянной скоростью подачи электродной проволоки. Для настройки режима выбирают необходимое напряжение дуги по шкале источника, а сварочный ток регулируют изменением скорости подачи проволоки.

На рисунке 4.4а приведены две вольт-амперные характеристики (ВАХ) источника сварочного тока, кривые 1 и 2 и две статические характеристики сварочной дуги для двух значений ее длины, кривые l_1 , l_2 ($l_1 > l_2$).

Для определенной длины дуги l_1 и выбранного напряжения U существует устойчивая рабочая точка А (точка пересечения внешней характеристики

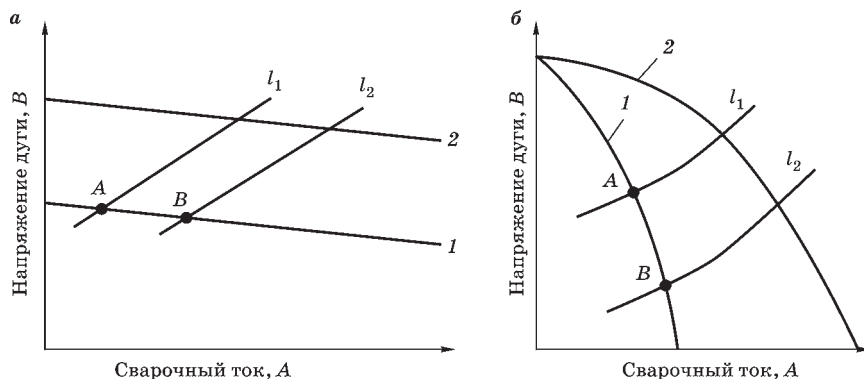


Рис. 4.4
Пологопадающие ВАХ источника питания (а), крутопадающие ВАХ источника (б) и статические характеристики дуги

источника I и характеристики дуги l_1 , в которой скорости плавления и подачи проволоки равны).

При увеличении скорости подачи проволоки образуется новая точка B пересечения характеристик источника и дуги. Длина дуги и ее сопротивление в этой точке уменьшаются, а сварочный ток растет. Это означает, что увеличение скорости подачи ведет к возрастанию сварочного тока и наоборот, уменьшение скорости подачи проволоки снижает сварочный ток. При случайных укорочениях либо удлинении дуги возрастание или уменьшение сварочного тока сопровождается соответствующим изменением скорости плавления проволоки, приводящим к восстановлению длины дуги.

Все полуавтоматы для механизированной сварки в защитных газах и под флюсом построены на основе принципа саморегулирования.

Другой принцип регулирования основан на изменении скорости подачи электродной проволоки в зависимости от напряжения на дуге. Данный принцип реализуется в автоматах для сварки проволоками более 3 мм. Здесь для поддержания стабильного горения дуги используют регуляторы напряжения дуги. Источник сварочного тока должен иметь крутопадающую внешнюю ВАХ, а привод подачи — обеспечивать зависимую скорость подачи проволоки от напряжения дуги. В этой комбинации при случайных отклонениях длины дуги сигнал изменения напряжения дуги воздействует на регулятор скорости подачи проволоки и восстанавливает первоначальную длину дуги.

На рисунке 4.4б показаны крутопадающие ВАХ источника: 1 — малые токи, 2 — большие токи и две статические характеристики дуги; l_1 — малые напряжения, l_2 — большие напряжения. При этой системе регулирования сварочный ток изменяют регулятором источника, а напряжение дуги — регулятором скорости подачи проволоки.

В автоматах для сварки вольфрамовым электродом регулирование напряжения осуществляется изменением длины дугового промежутка путем перемещения электрода по высоте специальной автоматической системой стабилизации напряжения дуги.

4.3.2. ПОЛУАВТОМАТЫ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Аппарат для механизированной дуговой сварки, включающий горелку и механизм подачи проволоки с ручным перемещением горелки, называют полуавтоматом.

Классификация полуавтоматов. Полуавтоматы классифицируются по следующим признакам:

- *по способу защиты сварочной зоны* — для сварки под флюсом, в среде защитных газов, открытой дугой;
- *по виду применяемой проволоки* — для сплошной, порошковой или комбинированной проволоки;
- *по способу подачи проволоки* — толкающего, тянущего и комбинированного типа;
- *по конструктивному исполнению* — со стационарным, передвижным и переносным подающим устройством.

1 — газовый баллон; 2 — редуктор газовый с подогревателем; 3 — шланг газовый; 4 — кабель управления; 5 — блок управления (БУСП); 6 — кабель управления; 7 — направляющий кабель; 8 — горелка; 9 — механизм подачи проволоки; 10 — кабель сварочный «-»; 11 — кабель сварочный «+»; 12 — источник питания.

Механизм подачи электродной проволоки обеспечивает поступление ее в сварочную горелку через направляющий кабель с заданной скоростью.

Гибкий шланг в полуавтоматах предназначен для подачи электродной проволоки, сварочного тока, защитного газа, подключения проводов управления, а иногда и охлаждающей воды к горелке. С этой целью применяют шланговый провод специальной конструкции или составные шланги, состоящие из нескольких трубок для подачи газа и воды и проводов управления и подвода тока, собранных в общий жгут.

Блок управления сварочным процессом (БУСП) предназначен для установки и регулирования параметров сварочного цикла. БУСП обеспечивает: включение полуавтомата в режим «сварка» кнопкой, расположенной на сварочной горелке; плавное регулирование скорости подачи электродной проволоки

и сварочного напряжения на источнике питания резисторами, расположенными внутри подающего механизма; включение подачи защитного газа при нажатии кнопки на горелке с ручной регулировкой длительности («Предварительная продувка») и ручную регулируемую выдержку на отключение подачи защитного газа после отключения сварочного источника («Защита сварочной ванны») в режиме «Длинные швы». Блок управления может располагаться как в источнике питания, так и в корпусе механизма подачи присадочной проволоки, возможно также внешнее расположение, при этом БУСП подключается через внешние разъемы.

Газовая аппаратура служит для подачи защитного газа в зону сварки — газовые редукторы, подогреватели и осушители газов, расходомеры, смесители газов, электромагнитные газовые клапаны.

Полуавтоматы для сварки под флюсом имеют те же основные узлы, что и полуавтоматы для механизированной сварки в защитных газах, только вместо газовой аппаратуры применяется специальная воронка, обеспечивающая подачу флюса в зону сварки. Однако эти полуавтоматы не нашли широкого применения, так как они могут быть использованы только для сварки в нижнем положении.

Автоматы для дуговой сварки. Сварочные аппараты, обеспечивающие автоматическое выполнение основных технологических перемещений электрода и дуги с поддержанием постоянства заданных параметров сварочного режима (напряжения дуги, сварочного тока, скорости сварки), называют автоматами.

Классификация автоматов. Автоматы классифицируются по следующим признакам:

- *по типу применяемого электрода* — автоматы с плавящимся электродом и автоматы с неплавящимся (вольфрамовым) электродом;
- *по способу перемещения тележки* — автоматы тракторного типа и кареточные;
- *по способу защиты сварочной ванны* — автоматы для сварки под флюсом, в среде защитных газов и универсальные;
- *по пространственному выполнению сварных соединений* — автоматы для сварки швов в нижнем, вертикальном и горизонтальном положениях; кольцевых поворотных и неповоротных стыков и кольцевых в горизонтальной плоскости;
- *по числу горящих дуг* различают автоматы для сварки одной дугой, трехфазной дугой и многодуговые (многоэлектродные);
- *по способу поддержания постоянства параметров дуги* выпускают автоматы с принудительным регулированием напряжения дуги и саморегулированием.

Комплектование и основные узлы автоматов. Автоматы для дуговой сварки в защитных газах обеспечивают выполнение следующих операций:

- зажигание дуги в начале сварки;
- подачу электрода (или присадочного материала) в зону дуги по мере его оплавления;
- регулирование и стабилизацию параметров режима сварки;
- передвижение дуги вдоль свариваемых кромок;

- защиту зоны дуги и сварочной ванны от воздействия воздуха;
- направление электрода по шву;
- прекращение процесса сварки с совмещением операций заварки кратера и прекращения подачи защитного газа через определенный интервал времени.

Конструкция автоматов для сварки должна обеспечивать быструю переналадку режима сварки, надежность, удобство обслуживания, безопасность работы. Автоматы должны быть малогабаритными, небольшой массы и отвечать требованиям промышленной эстетики.

Сварочные автоматы состоят из следующих основных узлов: сварочной головки, механизма перемещения, аппаратуры управления, механизма поддержания постоянства длины дуги (АРНД — для сварки неплавящимся электродом), а также аппаратуры, обеспечивающей подачу в зону сварки защитного газа.

Большую группу аппаратов для дуговой автоматической сварки составляют подвесные сварочные головки. Их применяют главным образом в установках, когда в процессе сварки передвигается изделие или когда головка закреплена на перемещающейся части установки. Часто в качестве подвесных сварочных головок применяют отдельные узлы самоходных аппаратов. Однако в некоторых случаях подвесные сварочные головки выпускаются заводами-изготовителями в виде автономных агрегатов, оснащенных пультом управления и шкафом электроаппаратуры.

Подвесные головки, как правило, состоят из сварочной горелки, механизма подачи присадочной проволоки, механизмов для установочных перемещений горелки, катушки для электродной проволоки и устройства для закрепления головки на консоли или траверсе.

Основными элементами *сварочной головки* являются: механизм подачи проволоки, токоподводящий мундштук (горелка — у автоматов для сварки в защитных газах).

Механизм перемещения предназначен для перемещения головки вдоль свариваемого стыка со скоростью сварки.

Аппаратура управления обеспечивает управление процессом сварки и содержит блок управления и пульт управления.

Механизм поддержания постоянства длины дуги (АРНД), представляет собой замкнутую систему автоматического регулирования с воздействием на пространственное положение электрода относительно поверхности изделия. Принцип построения АРНД основан на использовании функциональной зависимости $U_d = f(l_d)$ при сварке неплавящимся электродом.

Для сварки в защитных газах аппаратура, обеспечивающая защиту зоны сварки, представляет собой газовую аппаратуру, а для сварки под флюсом — аппаратура, обеспечивающая подачу флюса в зону сварки и удаление расплавленного при сварке флюса.

4.3.3. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМОВ ПОДАЧИ

Сварка с присадочной или электродной проволокой требует непрерывного ввода в зону горения дуги определенного количества проволоки, причем для качественного формирования сварного шва необходимо

обеспечивать равенство скорости подачи и скорости плавления электродной проволоки и точность дозировки присадочной проволоки, поступающей в сварочную ванну. Эти требования должен обеспечивать механизм подачи проволоки.

Общие требования к механизмам подачи. Конструкция каждого механизма подачи проволоки обладает своими особенностями, которые обусловлены как способом сварки, так и общей конструкцией сварочной головки. Однако основными требованиями, которым должен удовлетворять каждый механизм подачи проволоки, являются следующие:

- непрерывное сообщение проволоке осевого усилия, необходимого для преодоления всех сил сопротивления, возникающих на пути ее движения;
- исключение возможности деформирования проволоки или повреждения ее поверхности;
- обеспечение длительного цикла работы механизма подачи проволоки;
- доступность обслуживания при эксплуатации: заправке проволоки, регулировании силы прижатия роликов, замене изношенных роликов, чистке направляющих втулок и трактов.

Кроме этого, механизм подачи проволоки должен иметь минимальные размеры и массу.

Устройство механизмов подачи. По методам преобразования вращательного движения в поступательное все механизм подачи проволоки можно разделить на роликовые и безроликовые механизмы подачи.

В общем случае, конструкция *роликовых механизмов подачи* проволоки состоит из следующих узлов: редуктора, подающих роликов с пружинно-рычажной системой и направляющих втулок.

Редуктор обеспечивает вращение роликов с определенной скоростью и соединен с электродвигателем муфтой. Редуктор может быть цилиндрическим, червячно-цилиндрическим или планетарным. В механизме подачи проволоки применяют двигатели переменного и постоянного тока. Двигатели постоянного тока, позволяющие регулировать скорость подачи проволоки в большом диапазоне, нашли более широкое применение. В большинстве механизмов подачи применяют двигатели мощностью 40...180 Вт.

Система роликов преобразовывает вращательное движение роликов в поступательное движение проволоки. Роликовая система состоит из подающего ролика, который установлен на выходном валу редуктора, и прижимного ролика, устанавливаемого на одном из плеч двухплечевого рычага пружинно-рычажного узла. Пружинно-рычажный узел обеспечивает контакт роликов с поверхностью проволоки и определенное усилие поджатия для создания заданной осевой силы при подаче проволоки.

Роликовые устройства для подачи электродной проволоки часто содержат один приводной и один прижимной ролик. Для стальной проволоки диаметром 1,6...2,5 мм, а также для порошковой или алюминиевой проволоки применяют две пары приводных и прижимных роликов. Форма рабочей поверхности роликов может быть цилиндрическая гладкая, цилиндрическая с накаткой или канавкой, коническая.

Приемно-направляющие втулки служат для направления проволоки в зазор между роликами и на выходе из роликов в тракт. Втулка, стоящая перед

роликами со стороны кассеты, направляет проволоку в зазор между роликами называется направляющей, а стоящая за роликами со стороны тракта — приемной. Обычно приемная втулка выполняется совместно с трактом, и поэтому в большинстве случаев она устанавливается с возможностью съема в специальной кронштейне на корпусе редуктора. При использовании проволок большого диаметра (от 3 мм), для уменьшения блуждания торца электрода перед мундштуком устанавливают роликовый механизм правки проволоки.

Безроликовые механизмы, как правило, используются для импульсной подачи проволоки. Они могут быть с приводами периодического действия (электромагнитные, гидравлические и пневматические) и с электродвигателями.

Примером *безроликового механизма* может служить механизм с шариковыми захватами и электромагнитным приводом, который применяют для импульсной подачи проволоки. Применение таких механизмов позволяет снизить разбрызгивание.

На рисунке 4.6 показан механизм импульсной подачи проволоки с шариковым и электромагнитным приводом втяжного типа. В этом приводе магнитопровод 4, крышка 7, якорь 6 и сердечник 2 образуют замкнутую магнитную систему. Внутри магнитопровода 4 расположена обмотка 5. Подача проволоки 1 осуществляется быстродействующими шариковыми захватами, один из которых 3 расположен на сердечнике 2, а второй — на якоре. Работает механизм

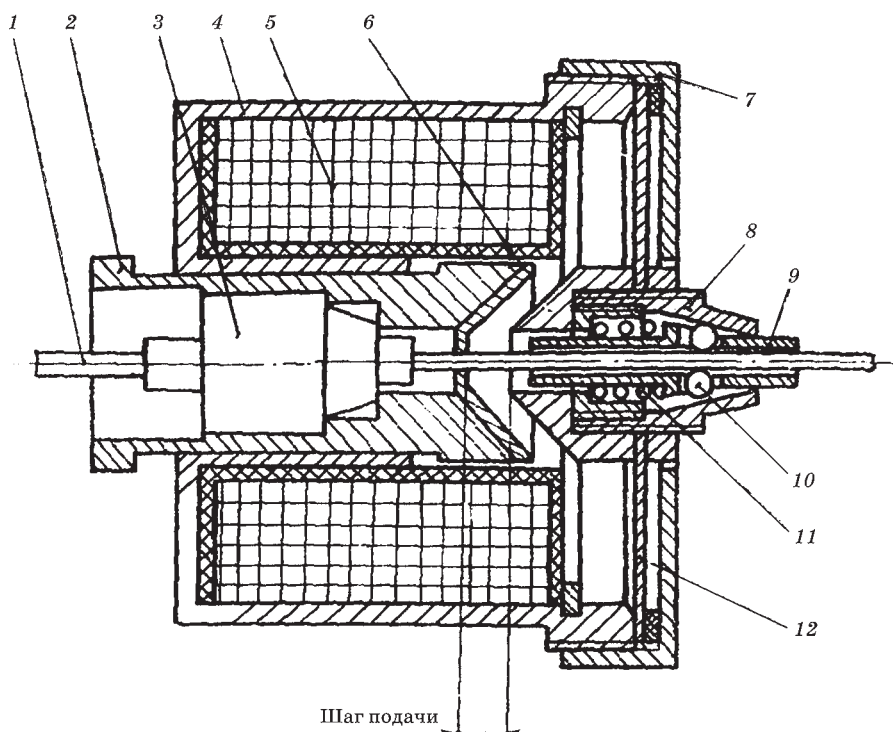


Рис. 4.6

Механизм импульсной подачи с шариковыми захватами и электромагнитным приводом

подачи следующим образом. При подаче импульсного напряжения на обмотку 5 возникает электромагнитная сила, которая перемещает якорь 6, установленный на мембране 12 и связанный с ними захват на величину установленного рабочего зазора. При этом шарики 10, находящиеся в прорезях подпружиненного пружинной 11 штока 8, действием корпуса оправки зажимают проволоку 1 и перемещают ее шаг на шаг подачи. Снятие напряжения с обмотки сопровождается исчезновением магнитного поля и электромагнитной силы, якорь 6 и захват под действием упругих сил мембраны 12 возвращаются в исходное положение. При этом захват проскальзывает по проволоке 1, удерживаемой в этот момент времени шариковым захватом 3, расположенным на сердечнике 2. Скорость подачи проволоки регулируется изменением шага подачи и частоты пульсации тока в обмотке 5.

Различают три основные системы подачи электродной проволоки *по месту расположения механизма подачи*:

- 1) толкающего типа;
- 2) тянуще-толкающего типа;
- 3) тянущего типа.

Система подачи *толкающего типа* является наиболее распространенной и используется во всех полуавтоматах, выпускаемых отечественной промышленностью. К недостаткам этой системы относятся ограничение длины шланга (до 3 м), изгиб проволоки в направляющем канале, невозможность подачи проволоки малого диаметра и значительные усилия в механизмах подачи. Преимуществами являются простота устройства, небольшие размеры и масса горелки, которые служат основными критериями для оператора-сварщика.

Система подачи *тянуще-толкающего типа* комбинированная, усилия в ней минимальны. Такая система может быть использована для подачи тонких (диаметром менее 1 мм) проволок на значительное (до 10–20 м) расстояние. Однако горелка в такой системе имеет большую массу и габариты. При отсутствии в системе полной синхронизации используют один двигатель с постоянным моментом (толкающий), а другой — с постоянной скоростью (тянущий).

В системе подачи *тянущего типа* к электродной проволоке приложена сила натяжения и проволока не изгибается в направляющем канале, но при скручивании канала существует опасность разрыва проволоки. Горелка в этой системе имеет значительные размеры и массу.

По *технологическому назначению* в зависимости от способа сварки все механизмы подачи можно разделить на механизмы подачи присадочной проволоки и механизмы подачи электродной проволоки. Конструктивно они мало чем отличаются один от другого, за исключением разных передаточных отношений редукторов, так как скорости присадочной и электродной проволоки различны. Кроме того, для сварки под флюсом применяют проволоку большего диаметра, чем при сварке в защитных газах (для сварки под флюсом проволока 1...6 мм, а для сварки в защитных газах — 0,5...2,4 мм.).

4.3.4. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Как правило, механизм перемещения представляет собой электропривод, состоящий из двигателя постоянного или переменного тока и редуктора. В некоторых автоматах, таких как автоматы типа АДФ,

редукторы механизма подачи проволоки и механизма перемещения приводятся в движение общим электродвигателем переменного тока. Наличие одного электродвигателя является характерной особенностью автоматов данного типа. Скорости подачи электродной проволоки и сварки не зависят от напряжения сварочной дуги.

Для установочных перемещений автоматов применяются либо отдельные привода, обеспечивающие передвижения автомата с маршевой скоростью, либо автомат передвигается вручную, предварительно выключив сцепление.

Различают механизмы перемещения тракторного типа и самоходные подвесные тележки.

Тележки тракторного типа перемещаются по направляющим рельсам либо непосредственно по свариваемому изделию.

К автоматам тракторного типа относятся: автоматы типа АДГ и АДФ, которые предназначены для выполнения сварки плавящимся электродом в среде защитных газов или под флюсом (рис. 4.7). В процессе сварки автомат передвигается по изделию или уложенной на нем легкой направленной линейке. Для ручного перемещения автомата к месту начала сварки тележка имеет фрикционную муфту для отключения от сцепления с электроприводом.

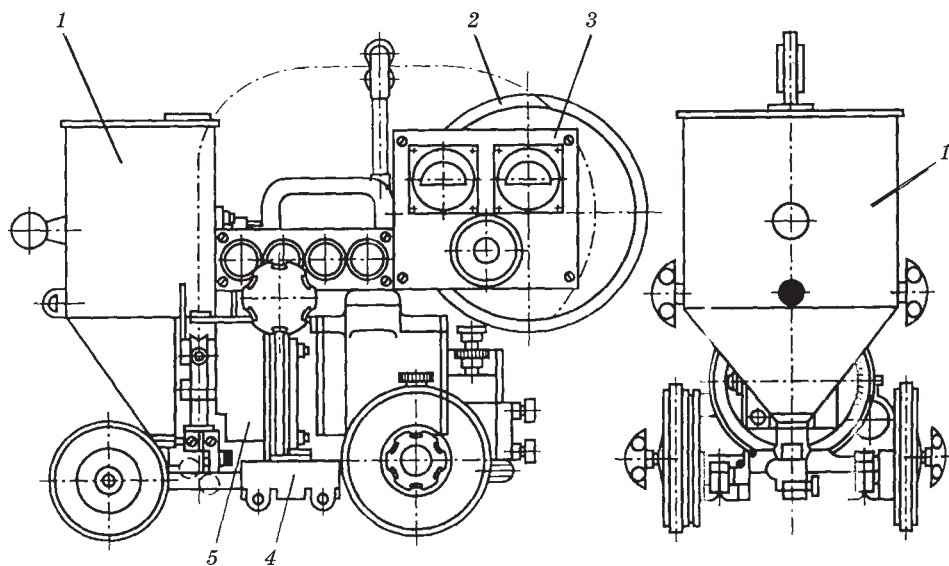


Рис. 4.7
Автомат АДФ-1002 (ТС-17):

1 — бункер для флюса; 2 — кассета; 3 — пульт; 4 — тележка; 5 — сварочная головка.

Самоходная подвесная тележка перемещается на колесном ходу по специальным направляющим и служит основой для крепления остальных частей сварочного автомата.

По расположению колес различают тележки велосипедного и кареточного типов. Тележки велосипедного типа имеют два опорных колеса, расположенных в одной плоскости, и один поддерживающий ролик, размещаемый над

опорными колесами или под ними. Кареточные тележки имеют четыре или три колеса, разнесенные по горизонтали.

Примером автоматов с самоходными тележками могут служить автоматы типа А-1417 и А-1416 для дуговой сварки плавящимся электродом в среде углекислого газа и для однодуговой сварки под флюсом. Автоматы состоят из сварочной головки, системы подачи газа или флюсоаппарата и самоходной тележки велосипедного типа с независимым механическим приводом для перемещения автомата с рабочей и маршевой скоростями. Данные автоматы являются базовыми моделями самоходных автоматов. На базе автомата А-1416 выпускается самоходный автомат А-1412 (рис. 4.8), который предназначен для двухдуговой сварки под флюсом переменным током и комплектуется двумя источниками питания.

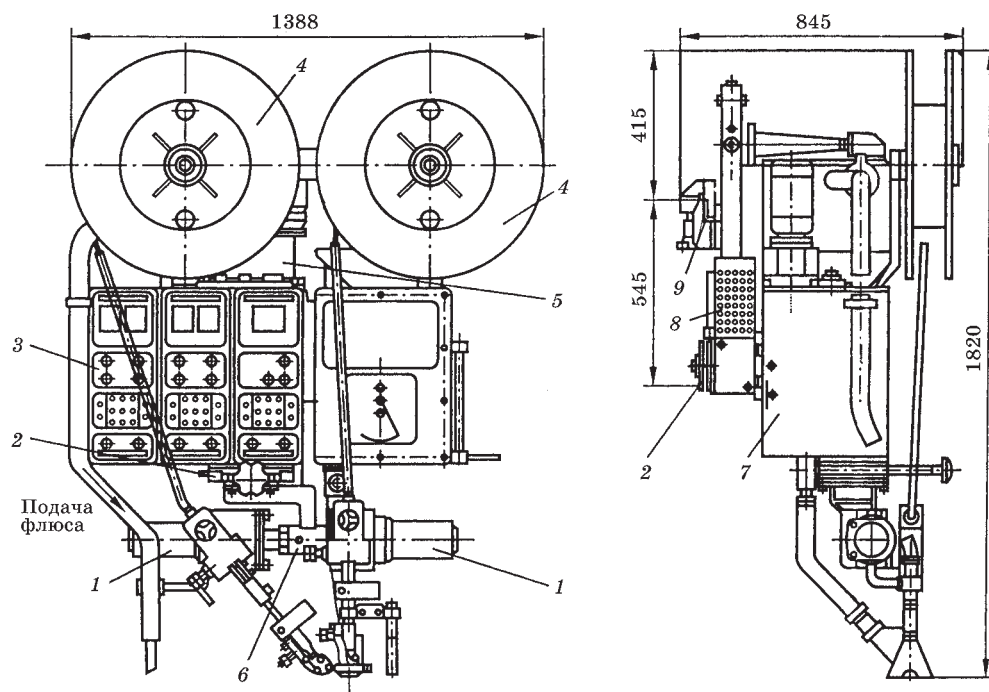


Рис. 4.8
Двухдуговой сварочный автомат А-1412:

1 — подающие механизмы; 2 — опорный монорельс; 3 — пульт управления; 4 — кассета; 5 — флюсобункер; 6 — подвеска для крепления подающих механизмов; 7 — механизм вертикального перемещения; 8 — самоходная тележка; 9 — фиксатор опрокидывания.

В автоматах для сварки неповоротных кольцевых стыков тележка перемещается по направляющим, имеющим форму окружности, с помощью электродвигателя. Примером автоматов для сварки неповоротных кольцевых стыков могут служить автоматы типа ОДА, типа АСТ и т.д. Конструктивные схемы аппаратов для сварки неповоротных стыков труб показаны на рисунке 4.9.

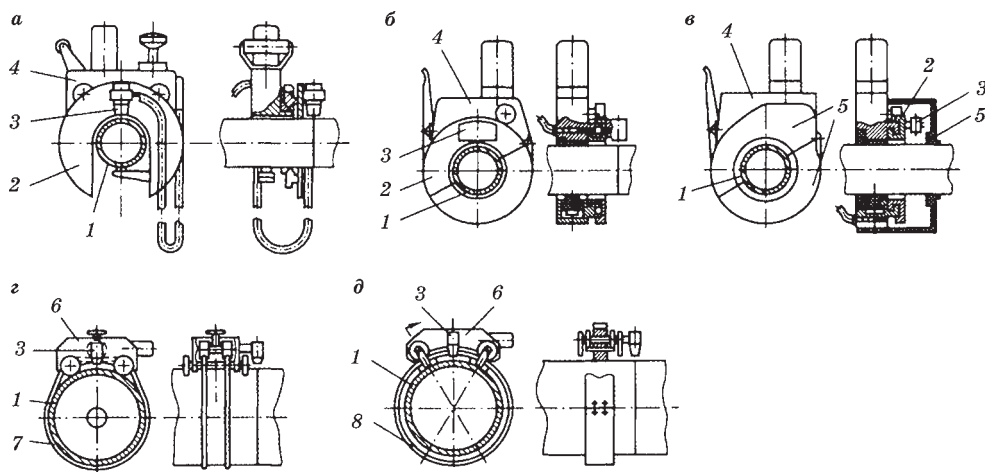


Рис. 4.9

Конструктивные схемы автоматов для сварки труб:

а — С-образный открытый аппарат; *б* — корпусный разъемный открытый аппарат; *в* — корпусный разъемный камерный аппарат; *г* — тракторный аппарат, перемещаемый по поверхности трубы; *д* — тракторный аппарат с неподвижной направляющей; 1 — труба; 2 — планшайба; 3 — горелка; 4 — корпус; 5 — камера; 6 — каретка; 7 — гибкий элемент поджатия аппарата к трубе; 8 — жесткая направляющая.

4.3.5. ГАЗОВАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ СВАРКИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

Для подготовки, управления подачей газа при сварке в защитных газах служит газовая аппаратура — газовые редукторы, подогреватели и осушители газов, расходомеры, смесители газов, электромагнитные газовые клапаны.

Редукторы (рис. 4.10) предназначены для понижения давления газа, поступающего из баллона или распределительного трубопровода, и автоматического поддержания постоянным заданного рабочего давления.

Давление газа в баллоне показывает манометр высокого давления 4. Газ проходит через приоткрытый пружиной 11 клапан 7 и поступает в камеру низкого давления 10. Это давление показывает манометр низкого давления 9. Из камеры низкого давления защитный газ через вентиль подается в сварочную головку.

Регулирование рабочего давления происходит следующим образом. Регулировочным винтом 12 сжимают пружины 11 и 5, при этом клапан 7 открывается и давление в камере низкого давления повышается. При вывертывании винта, наоборот, давление газа уменьшается. Автоматическое поддержание рабочего давления в редукторе осуществляется следующим образом. С уменьшением расхода газа давление в камере низкого давления будет возрастать, мембрана 1 отойдет вниз и сожмет пружину 11. При этом пружина 5 закроет клапан 7 и будет держать его в таком положении до тех пор, пока давление в камере 10 не станет вновь равным первоначальному. Наоборот, с увеличением расхода газа его давление в камере низкого давления уменьшается, мембрана под действием

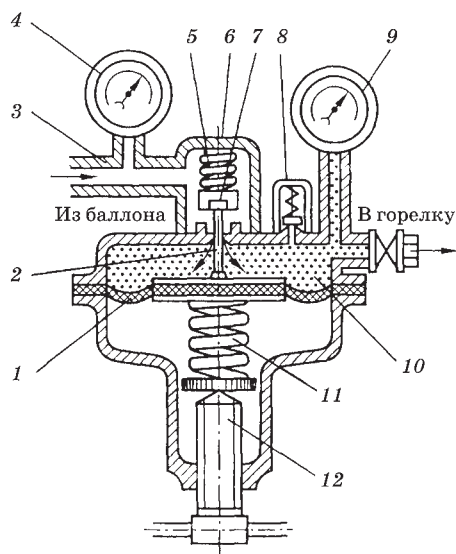


Рис. 4.10
Схема редуктора:

1 — мембрана; 2 — передаточный диск со штифтами; 3 — штуцер впуска газа; 4 — манометр высокого давления; 5 — вспомогательная пружина; 6 — камера высокого давления; 7 — редуцирующий клапан; 8 — предохранительный клапан; 9 — манометр низкого (рабочего) давления; 10 — камера низкого давления; 11 — главная зажимная пружина; 12 — регулирующий винт.

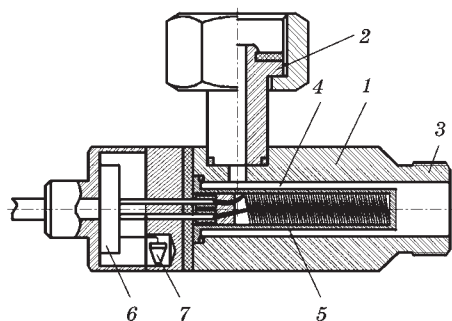


Рис. 4.11

Подогреватель углекислого газа:

1 — корпус; 2 — штуцер входа; 3 — штуцер выхода; 4 — коаксиальный зазор; 5 — трубчатый нагревательный элемент; 6 — блок управления; 7 — световой индикатор.

пружины перемещается вверх и открывает клапан. При случайном повышении давления выше допустимого открывается предохранительный клапан 8 и сжатый газ выходит в атмосферу.

При сварке применяют также редукторы, которые одновременно являются расходомерами.

Подогреватель предназначен для подогрева углекислого газа, поступающего из баллона в редуктор, с целью предотвращения замерзания редуктора при большом расходе углекислого газа (вследствие поглощения теплоты при испарении жидкого углекислого газа). Подогреватель состоит из корпуса 1, входного 2 и выходного 3 штуцеров коаксиального зазора 4, по которому проходит углекислый газ, и нагревательного элемента 5 из хромоникелевой проволоки (рис. 4.11). Подогреватель крепят к баллону накидной гайкой. Питание осуществляется постоянным током напряжением 20 В или переменным током напряжением 36 В.

Осушитель, применяемый при использовании влажного углекислого газа, полученного из пищевой (неосушенной) углекислоты, может быть высокого и низкого давления. Осушитель высокого давления устанавливают перед понижающим редуктором. Осушители низкого давления целесообразно применять главным образом при централизованной газовой разводке. В качестве влагопоглотителя используют силикагель или алюмогликоль, реже — медный купорос и хлористый кальций. Силикагель и медный купорос, насыщенные влагой, осушают путем прокаливания при 250–300°C в течение 2 ч. Осушитель рассчитан на осушку 30–35 м³ углекислого газа при одной зарядке.

Расходомеры предназначены для измерения расхода защитного газа. Они могут быть поплавкового (ротаметр) и дроссельного типов.

Ротаметр состоит из стеклянной трубки, в которой находится легкий поплавок, свободно перемещающийся в ней. Чем больше расход газа и его плотность, тем выше поднимается поплавок. Ротаметр снабжен шкалой, тарированной по расходу воздуха. Для пересчета на расход защитного газа пользуются графиками.

Расходомер дроссельного типа построен на принципе измерения перепада давления на участках до и после дросселирующей диафрагмы, который зависит от расхода газа и измеряется манометрами. О примерном расходе защитного газа можно судить также по показанию манометра низкого давления газового редуктора. Для этого на выходе из редуктора устанавливают дроссельную шайбу (дюзу) с небольшим калиброванным отверстием. Скорость истечения газа через его отверстие, а следовательно, и расход газа будут пропорциональны давлению газа в рабочей камере. При использовании этого принципа в редукторе манометр показывает непосредственно расход газа, а не давление в рабочей камере.

Смесители предназначены для получения смесей газов CO_2 , O_2 или Ar.

Постовой смеситель для получения смеси газов CO_2 и O_2 , отбираемых из баллонов, и автоматического поддержания постоянными заданного состава и расхода газовой смеси состоит из регулятора давления с редуктором и узла смешения газов. Состав смеси изменяют заменой дюз.

Рамповый смеситель позволяет получить смесь CO_2 и O_2 при отборе кислорода от рампы баллонов, а углекислого газа — от изотермической емкости, содержащей сжиженный переохлажденный диоксид углерода. Смеситель обеспечивает питание газом 10...50 сварочных постов.

Газовый клапан используют для экономии защитного газа. Его следует устанавливать по возможности ближе к сварочной горелке. Наибольшее распространение получили электромагнитные газовые клапаны. Газовый клапан включают до зажигания дуги и выключают после обрыва дуги и полного затвердевания металла в кратере шва.

4.3.6. ФЛЮСОВАЯ АППАРАТУРА

При сварке под флюсом сварочные автоматы имеют специальную флюсовую аппаратуру, предназначенную для подачи флюса в зону сварки, удержания его на поверхности шва во время сварки и уборки нерасплавившейся части флюса.

По способу создания потока воздуха, транспортирующего флюс, флюсовые аппараты делятся на три вида: всасывающего действия, в которых флюс транспортируется разреженным воздухом; нагнетательного действия, в которых флюс транспортируется потоком сжатого воздуха; всасывающе-нагнетательного действия (комбинированные), в которых флюс на одних участках транспортируется разреженным воздухом, а на других — потоком сжатого воздуха.

По характеру циркуляции флюса флюсовые аппараты делят на три группы: с непрерывной циркуляцией, при которой флюс одновременно подается в зону сварки и всасывается после зоны сварки, непрерывно пополняя бункер аппарата (рис. 4.12а); с периодической циркуляцией, когда флюс одновременно подается в зону сварки и всасывается в промежуточную емкость, периодически

пополняя бункер, из которого флюс подается в зону сварки (рис. 4.12б); без циркуляции, когда при всасывании флюса невозможна его сыпка либо при сыпке невозможно всасывание (рис. 4.12в). В аппаратах последнего типа предусмотрено использование сжатого (разреженного) воздуха только для одной операции — либо для сыпки (пополнение бункера флюсом производится периодически при отключении пневмоподачи), либо для всасывания (сыпка производится при отключении всасывания).

Разрежение воздуха, необходимое для всасывания флюса, создается с помощью пневматических устройств (воздушных эжекторов) или электромеханических агрегатов. Преимущество пневматических устройств состоит в простоте, связанной с отсутствием движущихся частей, и малых размерах. Однако при использовании цеховой пневмосети требуется тщательное обезвоживание сжатого воздуха, подводимого к эжектору. В противном случае возможно увлажнение флюса и, как следствие, появление дефектов в сварном соединении. В связи с этим находят применение автономные пневмосистемы.

Во флюсовых аппаратах всасывающего действия под разрежением находится весь объем флюсоаппарата, включая всасывающую трубу (шланг) и бункер. Поэтому такие аппараты работают без циркуляции. В аппаратах нагнетательного действия весь объем находится под избыточным давлением, что также не позволяет осуществить циркуляцию флюса.

В аппаратах всасывающе-нагнетательного действия всасывающий шланг находится под разрежением, а бункер и труба для сыпки флюса в зону сварки

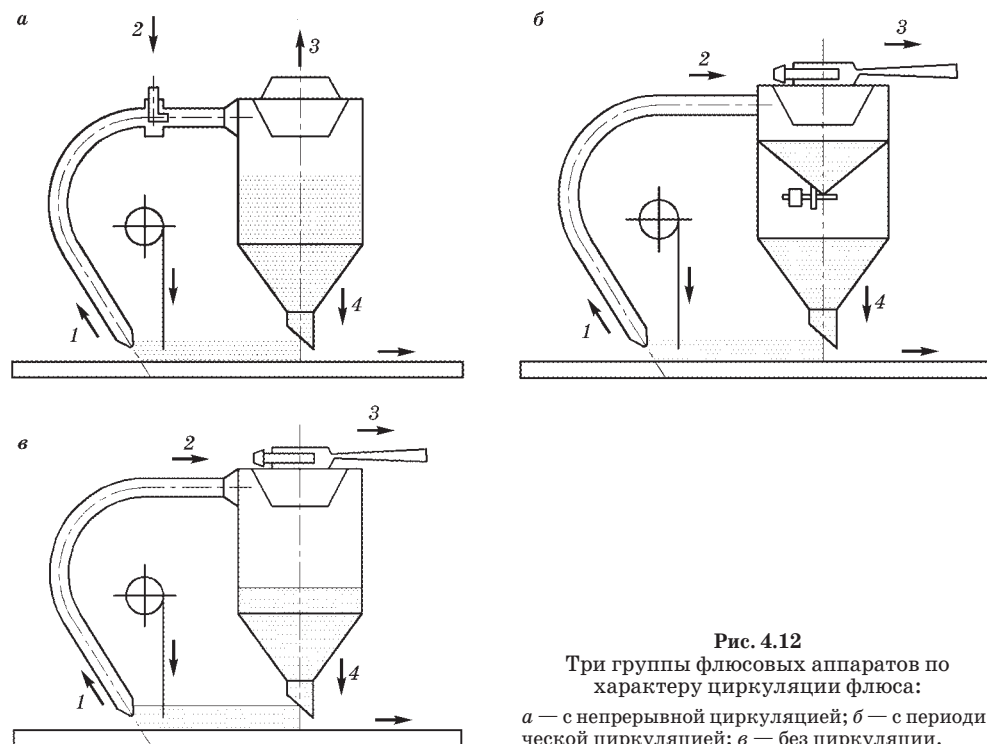


Рис. 4.12
Три группы флюсовых аппаратов по характеру циркуляции флюса:
а — с непрерывной циркуляцией; б — с периодической циркуляцией; в — без циркуляции.

(или впереди зоны сварки) — под избыточным давлением. Поэтому в таких аппаратах происходят одновременное всасывание и ссыпка флюса. Однако при применении этих аппаратов предъявляются повышенные требования к очистке воздуха от влаги. Кроме того, в аппаратах всасывающе-нагнетательного действия наблюдается более интенсивное измельчение флюса.

В двухкамерных флюсовых аппаратах всасывающего действия в верхней камере создается разрежение, а в нижней — давление, равное атмосферному. Флюс всасывается в верхнюю камеру, из которой периодически пересыпается в нижнюю (по мере наполнения верхней камеры или после сварки одного шва или заданного числа швов). На шов флюс равномерно подается самотеком из нижней камеры. Во флюсовых аппаратах этого типа отмечается наименьшее измельчение и увлажнение флюса при прочих равных условиях.

По *размещению* флюсовые аппараты бывают встроенные в сварочный аппарат и вынесенные, устанавливаемые отдельно от сварочного аппарата. Вынесенные флюсовые аппараты, в свою очередь, по транспортабельности и, следовательно, по условиям применения делятся на стационарные, передвижные и переносные.

4.3.7. СВАРОЧНЫЕ ГОРЕЛКИ И ТОКОПОДВОДЫ

Наиболее важным узлом любого сварочного аппарата для сварки в защитных газах является горелка. С помощью горелки возбуждается сварочная дуга и осуществляется формирование и направление струи защитного газа. В горелке закреплен электрод (в случае сварки неплавящимся электродом) или токоподводящий наконечник для направления подачи электродной проволоки (в случае сварки с плавящимся электродом).

Конструкция сварочной горелки должна обеспечивать безопасность работы, стабильность процесса сварки (наплавки) и эффективную газовую защиту зоны сварки. Для предотвращения обгорания корпус горелки должен быть электрически изолирован от мундштука. Для уменьшения налипания брызг расплавленного металла сопло горелки охлаждают, а его поверхность желательно полировать или хромировать. Налипание брызг электродного металла резко снижается, если сопло изготавливать из специальной керамики.

Эксплуатационные свойства горелок для дуговой сварки плавящимся электродом определяется качеством токоподводящего наконечника, прежде всего, его износостойкостью. При прохождении электродной проволоки наконечники быстро изнашиваются, в результате чего нарушается электрический контакт и ухудшается стабильность процесса сварки. Особенно это заметно в наконечниках с поджимным контактом, конструкция которых не получила широкого распространения.

Наиболее широкое применение получили трубчатые наконечники из меди без поджимного контакта, изготавливаемые точением или штамповкой. Срок службы их составляет от 5 до 10 часов непрерывной работы. На рисунке 4.13. показаны токоподводящие наконечники сварочных горелок.

Для обеспечения токоподвода при сварке под флюсом применяют мундштуки. Конструкции мундштуков различны в зависимости от способа сварки и диаметра проволоки. Для сварки электродной проволокой большого диаметра

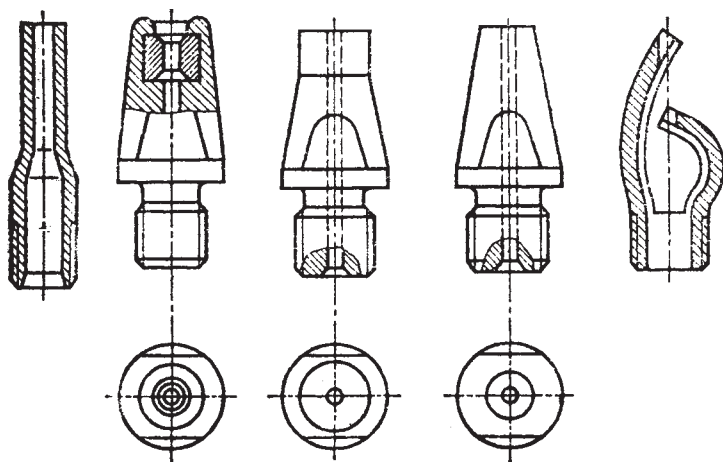


Рис. 4.13
Токоподводящие наконечники сварочных горелок

(3–5 мм) применяют мундштуки с роликовым скользящим контактом, а при меньшем диаметре (0,8–2,5 мм) — трубчатые мундштуки. Применяют также мундштуки колодочного типа, состоящие из двух подпружиненных колодок, и мундштуки сапожкового типа (рис. 4.14).

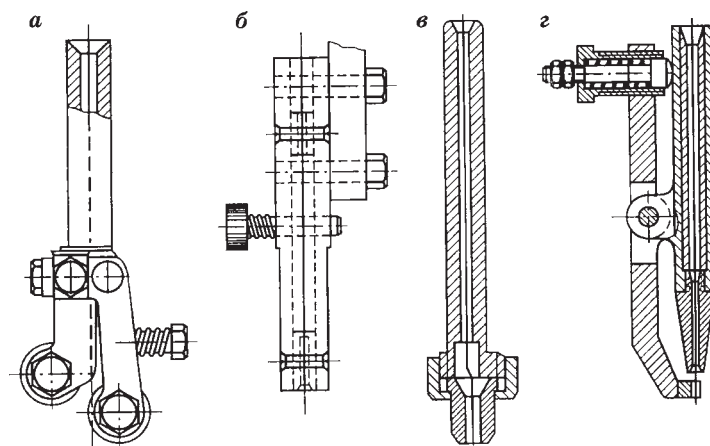


Рис. 4.14
Токоподводящие мундштуки для автоматов:
а — роликовый; б — трубчатый; в — колодочный; з — сапожковый.

Эффективность газовой защиты во многом зависит от размеров и конструкции горелки. В свою очередь размеры горелки выбирают с учетом рода защитного газа, типа сварного соединения и режима сварки. Для создания ламинарного потока защитного газа применяют различные схемы подвода газа в сопло (рис. 4.15). Оптимальная форма сопла — параболическая или коническая с цилиндрической частью на выходе.

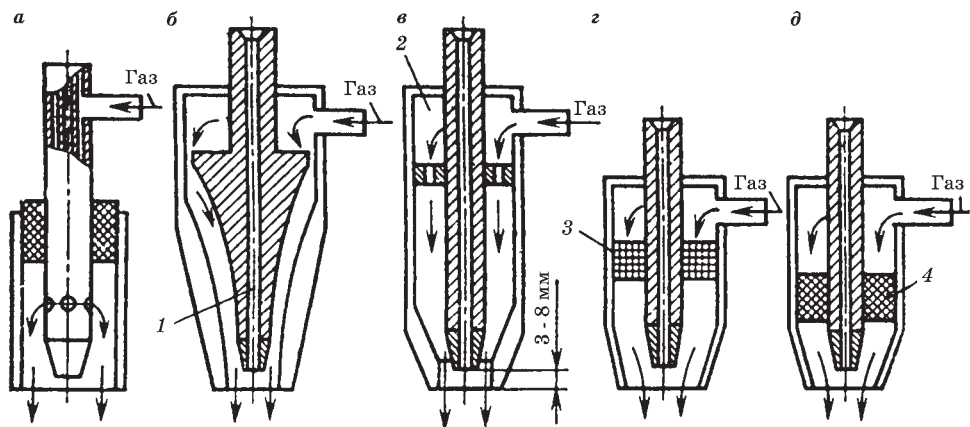


Рис. 4.15

Схемы питания газом сварочных горелок:

а — с кольцевым подводом газа; *б* — с отражателем; *в* — с успокоительными камерами; *г* — с сеточными вставками; *д* — с металлокерамическими вставками; 1 — отражатель; 2 — успокоительная камера; 3 — сетка; 4 — металлокерамика.

Горелки делятся в зависимости от типа электрода на горелки для сварки плавящимся и неплавящимся электродом; по применению — для ручной и автоматической сварки; по системе охлаждения — на горелки с естественным и водяным охлаждением.

Ручные горелки для плавящегося электрода чаще выполняются с держателем пистолетного типа. Эти горелки используют для дуговой полуавтоматической сварки в среде защитных газов.

Горелки для механизированной сварки выпускают на токи 125, 160, 200, 315, 400, 500 и 630 А. Для сварки в CO_2 на токах до 500 А горелки выполнены с естественным воздушным охлаждением (рис. 4.16). Для тяжелых условий работы на токах 500 и 630 А, а также для сварки в аргоне на токах > 315 А горелки имеют водяное охлаждение.

Горелки для сварки в защитных газах могут иметь центральный (концентричный) и боковой подвод газа. В первом случае газовое сопло представляет собой часть горелки, а во втором — отдельный патрубок, располагаемый сбоку от горелки.

Горелки с центральным подводом (рис. 4.17*а*) газа в целом аналогичны горелкам для механизированной сварки, но отличаются от них формой корпуса и иногда несколько большими размерами. Они применяются обычно для сварки швов во всех пространственных положениях, в том числе — в труднодоступных местах. Недостатком таких горелок является сильное забрызгивание сопловой части, что требует частой чистки сопла.

Горелки с боковой подачей защитного газа (рис. 4.17*б*) используются преимущественно для сварки прямолинейных протяженных швов, не ограниченных в пространстве. Возможна также сварка кольцевых швов. При боковой подаче защитного газа забрызгивание сопла минимальное. Обычно горелки для автоматической сварки током свыше 250 А имеют водяное охлаждение рабочей

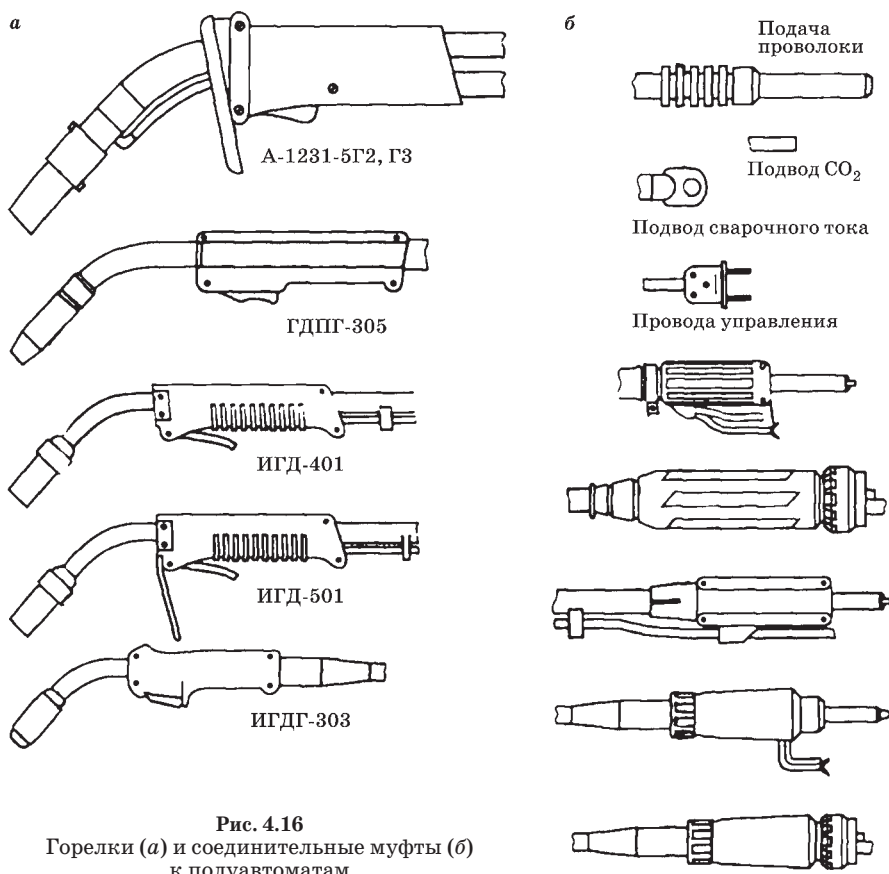


Рис. 4.16
Горелки (а) и соединительные муфты (б)
к полуавтоматам

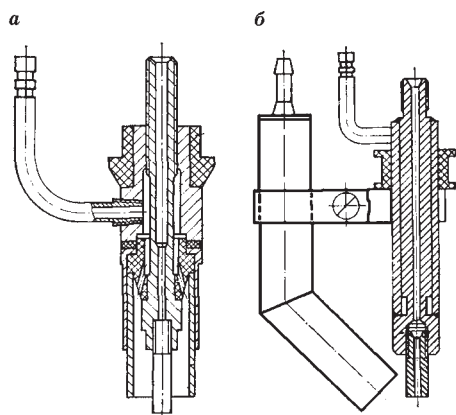


Рис. 4.17
Горелки для сварки плавящимся
электродом с центральной подачей газа (а)
и с боковой подачей газа (б)

части. Это значительно уменьшает налипание брызг металла на рабочую часть горелки, что сокращает простои, связанные с очисткой и заменой элементов горелки.

Горелки для автоматической сварки неплавящимся электродом, как правило, изготавливают с центральной подачей газа. Закрепление электрода горелки и организация газовой защиты аналогичны горелкам для ручной сварки. Горелки для автоматической сварки, также как и ручные горелки, могут быть выполнены с воздушным охлаждением для сварки на малых токах и средних токах, а также с водяным охлаждением для сварки на средних и больших токах.

4.4. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ

При электрошлаковой сварке с помощью сварочных аппаратов выполняют следующие действия:

- подачу электродной проволоки или плавящегося электрода в зону сварки со скоростью их плавления;
- перемещение сварочного аппарата вверх вдоль шва со скоростью сварки по мере заполнения зазора электродным металлом;
- принудительное формирование наружных поверхностей сварных швов с помощью водоохлаждаемых кристаллизаторов-ползунов;
- осуществление возвратно-поступательного движения электродов между торцами свариваемых кромок;
- автоматическое регулирование уровня сварочной ванны.

В зависимости от способа крепления и передвижения аппараты могут быть рельсового, безрельсового и подвесного типов (рис. 4.18).

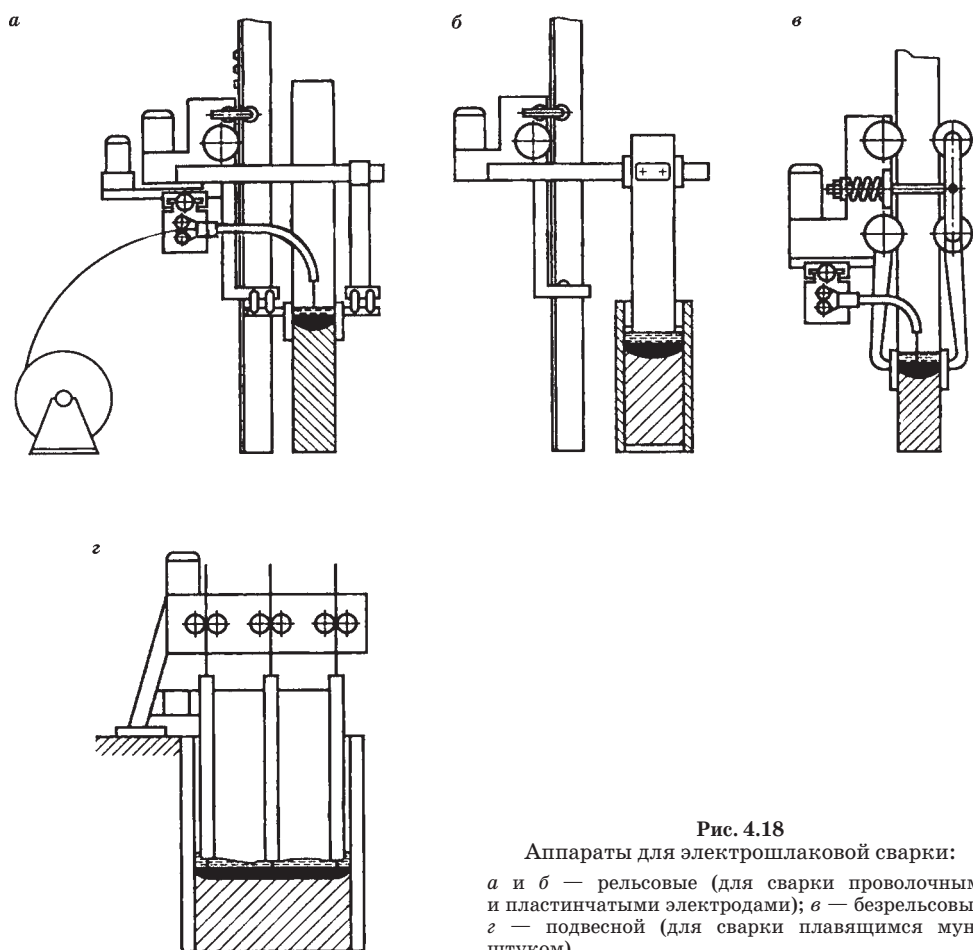


Рис. 4.18

Аппараты для электрошлаковой сварки:

а и *б* — рельсовые (для сварки проволочными и пластинчатыми электродами); *в* — безрельсовый; *г* — подвесной (для сварки плавящимся мунштуком).

Аппараты рельсового типа перемещаются вдоль шва по вертикально установленному рельсу или направляющим, укрепленным на свариваемом изделии параллельно шву. Рельсы или специальные направляющие снабжаются зубчатой рейкой, по которой движется зубчатое колесо ходового механизма. Рельсовый путь может быть жестким (для сварки прямолинейных швов) или гибким (для сварки криволинейных швов). Максимальная длина сварных швов сравнительно небольшая и определяется длиной рельса и зубчатой рейки. Аппарат такого типа приведен на рисунке 4.19.

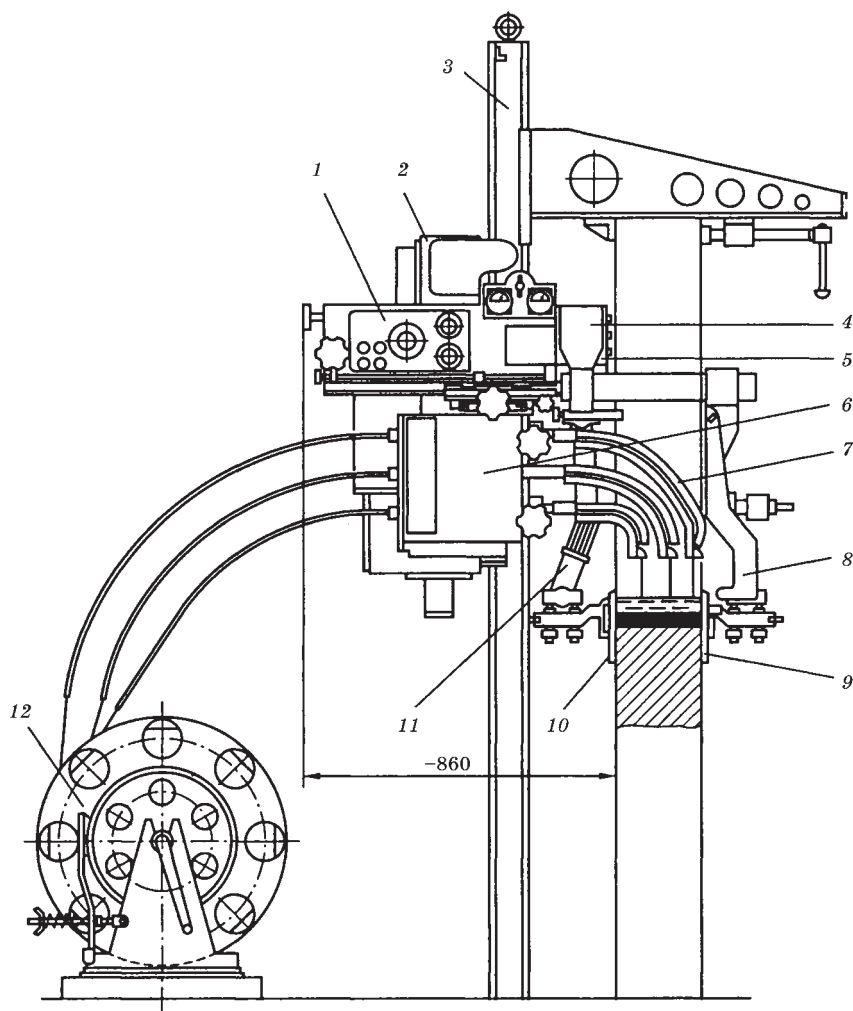


Рис. 4.19

Схема аппарата А-535 рельсового типа для электрошлаковой сварки прямолинейных стыков: 1 — пульт управления; 2 — ходовая тележка; 3 — колонна с рейкой; 4 — бункер для флюса; 5 — механизм поперечных колебаний мундштуков; 6 — механизм подачи электродных проволок; 7 — мундштук; 8 — подвеска обратного ползуна; 9 — формирующее устройство обратной стороны шва (обратный ползун); 10 — формирующее устройство передней стороны шва (передний ползун); 11 — подвеска переднего ползуна; 12 — катушка с электродной проволокой.

В процессе сварки скорость перемещения аппарата регулируется автоматически в зависимости от уровня металлической ванны относительно медных ползунов. С этой целью в один из ползунов вмонтирован щуп для контроля уровня ванны, электрически связанный с устройством для автоматического регулирования скорости сварки. При автоматической работе система обеспечивает поддержание уровня металлической ванны в пределах ± 2 мм относительно заданной величины.

Аппараты безрельсового типа применяют при сварке деталей сравнительно небольшой толщины (до 90–100 мм). Аппараты безрельсового типа применяют при большой длине шва, когда затруднено крепление рельса на изделии с необходимой точностью. В этой группе различают аппараты двух видов: с механическим прижимом и магнитошагающие.

Аппараты с механическим прижимом перемещаются непосредственно по изделию и копируют поверхность при сварке. Движение аппарата осуществляется за счет сил трения между ходовым механизмом и кромками детали. Для этого используют две тележки, расположенные по обе стороны свариваемого стыка и связанные между собой тягами, которые пропущены через зазор собранных деталей и стянуты пружинами.

Магнитошагающие подвесные аппараты удерживаются и перемещаются по вертикальной плоскости с помощью нескольких электромагнитов, связанных между собой кривошипным или эксцентриковым валом. При вращении вала электромагниты поочередно отрываются от изделия и передвигаются по направлению сварки. Сварка может производиться одним или двумя электродами. Электродная проволока подается по гибкому шлангу с помощью отдельного механизма подачи.

Аппараты подвесного типа не имеют ходового механизма, что делает их достаточно простыми и портативными. В состав таких аппаратов входят механизм подачи электродов и устройство для подвода сварочного тока к мундштуку. Аппараты подвесного типа можно разделить на три основные группы.

В аппаратах для сварки пластинчатыми и стержневыми электродами вместо проволочных электродов используют пластины размером 20×250 мм или стержни диаметром до 30 мм и более, а также стержни квадратного сечения. Одним из недостатков таких аппаратов является то, что максимальная высота сварного шва зависит от предельно возможной длины электродов. Схема такого аппарата показана на рисунке 4.20.

В аппаратах для сварки пластинчатыми или ленточными электродами механизмы подачи пластин содержат зажимные приспособления для одного или нескольких электродов и суппорт, передвигающийся по рельсу под действием реечного, винтового или иного привода. К суппорту прикреплены зажимные приспособления.

В аппаратах для сварки плавящимся мундштуком сварочный ток подводится к шлаковой ванне по мундштуку, внутри которого дополнительно подают присадочную проволоку. В процессе сварки плавятся как мундштук, так и проволока, которые и образуют наплавленный металл. Эти аппараты применяют для сварки изделий сложного профиля и при ремонтных работах.

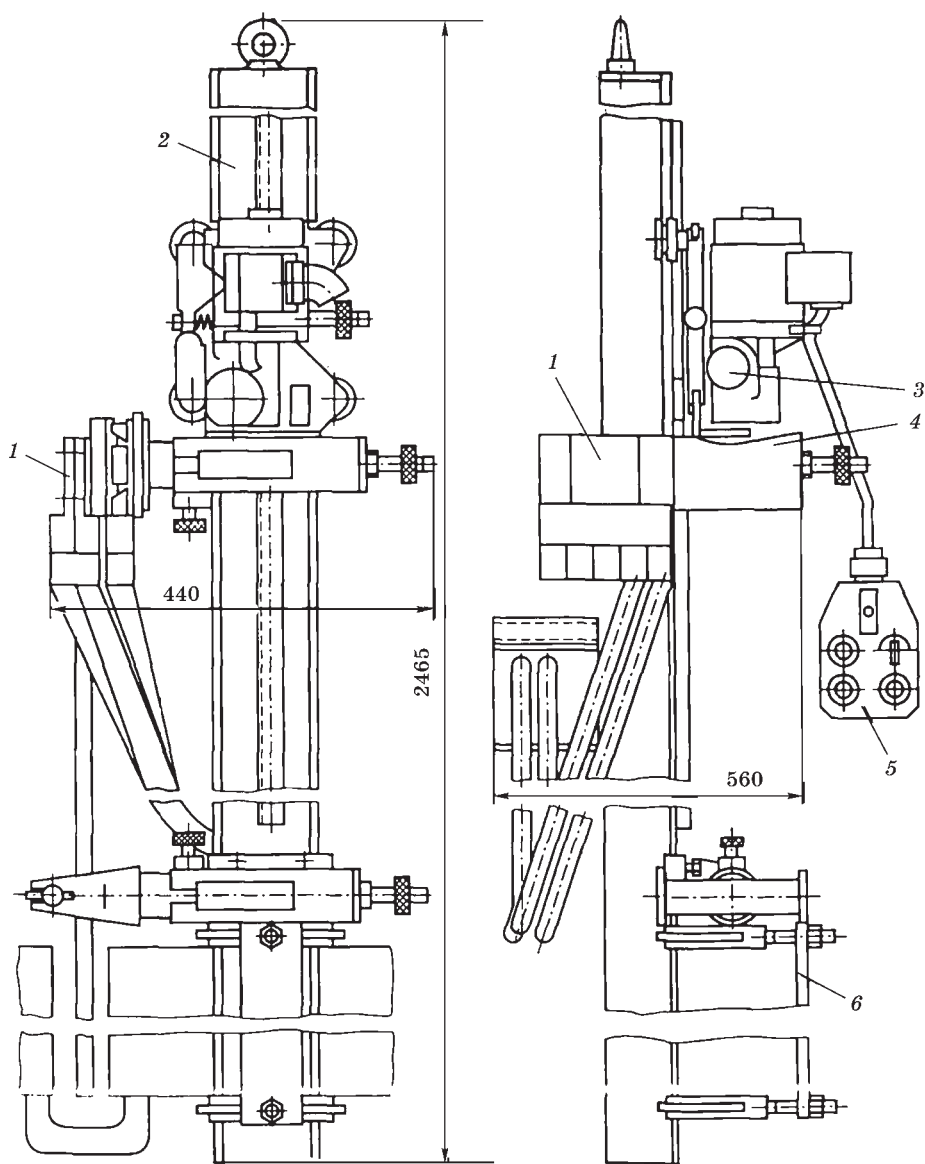


Рис. 4.20

Схема аппарата А-1517 подвесного типа для электрошлаковой сварки пластинчатым электродом:

1 — токоподводящее устройство; 2 — переносная колонна аппарата; 3 — приводная тележка вертикального перемещения электрода; 4 — механизм поперечной корректировки электрода; 5 — пульт управления; 6 — узел крепления колонны к изделию.

В аппаратах для выполнения кольцевых швов проволочными электродами механизм подачи проволоки установлен неподвижно, свариваемое изделие вращается с помощью обычных роликовых стенов (рис. 4.21).

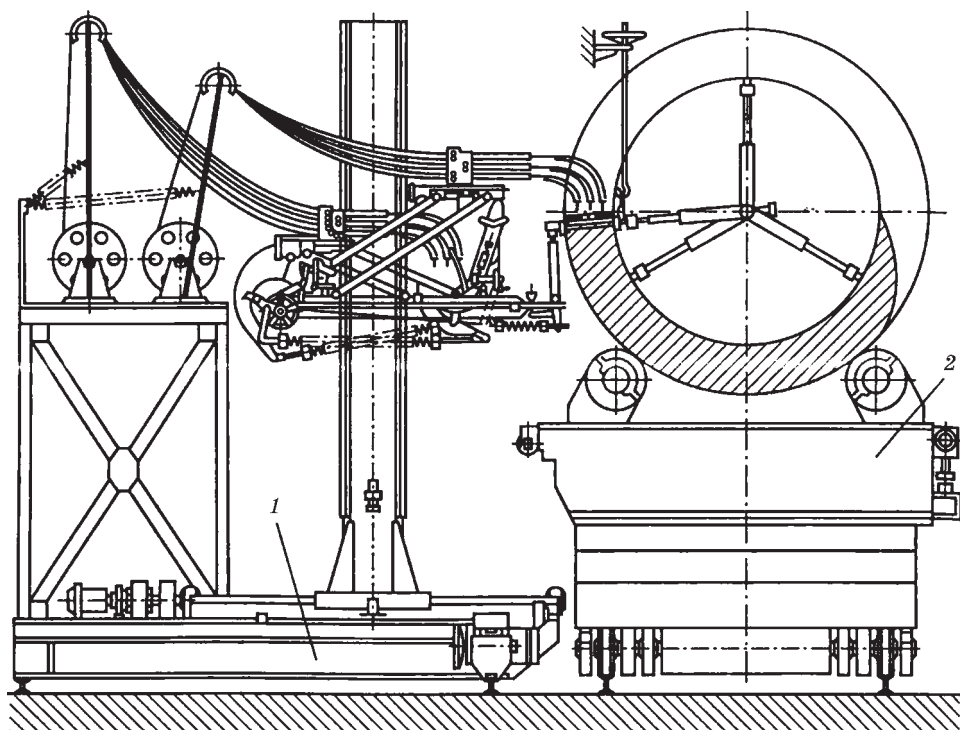


Рис. 4.21

Сборочно-сварочная установка для выполнения кольцевых швов, снабженная сдвоенным аппаратом:

1 — сварочный аппарат; 2 — роликовый стэнд.

Аппараты для электрошлаковой сварки имеют постоянную скорость подачи, не зависящую от напряжения дуги, что обусловлено процессом саморегулирования скорости плавления электрода. Источником питания служат сварочные трансформаторы с жесткой вольтамперной характеристикой и пониженным напряжением холостого хода.

4.5. ОСОБЕННОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ

Для ручной и механизированной плазменной сварки применяют как универсальные, так и специализированные установки. Плазменные установки представляют собой комплекты из плазмотрона (плазменной горелки), источника его питания, механизма подачи присадочной проволоки, механизма перемещения плазмотрона вдоль и поперек оси шва и системы управления электрическими и газовыми параметрами плазменной дуги.

Плазмотроны для сварки состоят из изолированных друг от друга катодного узла и плазмообразующей камеры, собранных в едином корпусе. Плазмотроны могут быть как прямого, так и косвенного действия.

В плазмотронах прямого действия (рис 4.22а) дуга горит между изделием и электродом, а защитный газ подается внутрь горелки и, вытекая через сопло, дополнительно сжимает столб дуги.

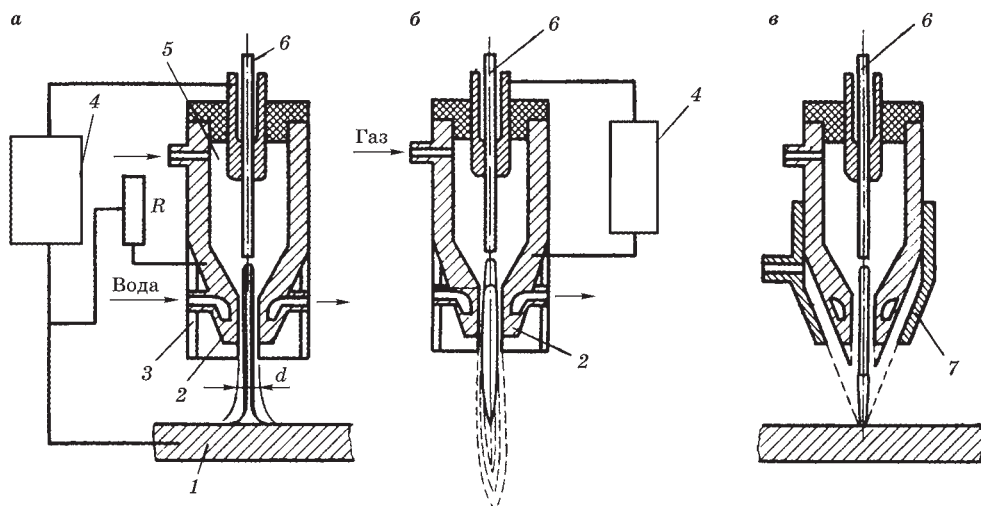


Рис. 4.22
Схема процесса сварки сжатой дугой:

а — дуга прямого действия; б — дуга косвенного действия; в — микроплазменная дуга; 1 — изделие; 2 — сопло; 3 — газозащитное сопло; 4 — источник питания; 5 — камера горелки; 6 — электрод; 7 — фокусирующее сопло.

Возбуждение дуги между электродом и изделием в плазмотронах прямого действия через узкий канал сопла осуществить трудно. Поэтому при помощи осциллятора возбуждается вспомогательная дуга между электродом и соплом, которая питается от того же источника, что и основная, через дополнительное сопротивление R . Затем, как только факел ионизированного газа коснулся изделия, автоматически загорается основная дуга и выключается вспомогательная.

При другой разновидности плазмотронов (рис. 4.22б) дуга горит между электродом и соплом. В этом случае газ нагревается дугой и в значительной мере ионизируется внутри плазмотрона. Плазменный поток направляется на изделие из сопла плазмотрона в виде концентрированного, высокотемпературного пламени.

В плазмотронах косвенного действия величина тока ограничена максимально допустимой тепловой нагрузкой на сопло (выше которой оно разрушается) и явлением шунтирования дуги в канале сопла, а в плазмотроне прямого действия — возникновением двойной дуги при электрическом пробое прослойки газа. Формирующие сопла являются сменными элементами. Как правило, их изготавливают из материала с повышенной теплопроводностью (чаще всего из меди) и охлаждают водой. Сопла малоамперных плазмотронов могут иметь воздушное охлаждение.

В плазмотронах для сварки в качестве рабочего и защитного газов используется в основном аргон (реже гелий). Катод может быть выполнен в виде

цельного стержня (рис. 4.23) из вольфрама, либо в виде составного стержня, состоящего из медной обоймы, к торцу которой припаян штифт из вольфрама, циркония или других тугоплавких металлов и сплавов. Обойма охлаждается водой. Вольфрамовый штифт припаявается серебряным припоем или приваривается методом диффузионной сварки, а циркониевый, будучи более пластичным, запрессовывается в обойму.

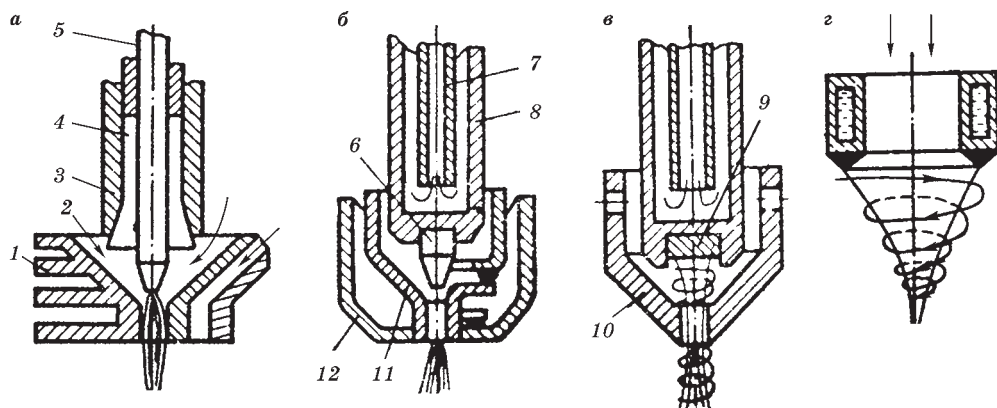


Рис. 4.23

Конструктивные элементы горелок-плазматронов для сварки сжатой дугой:

а — со стержневым электродом; б — со штифтом; в — со вставкой; г — кольцевой электрод; 1, 2 — сопла; 3 — втулка; 4 — цанга; 5 — стержневой электрод; 6 — штифт; 7 — трубка; 8 — обойма; 9 — вставки; 10, 11 — сопла; 12 — корпус сопла.

Применяются полые катоды, кольцевые (рис. 4.23г), дисковые и др. Все они выполняются водоохлаждаемыми.

Система стабилизации дуги обеспечивает сжатие столба и строгую его фиксацию по оси электрода и сопла плазматрона. Чаще всего дуга стабилизируется потоком вытекающего газа. Применяется также стабилизация водой или магнитным потоком. Стабилизирующий газ может подаваться вдоль оси столба дуги (осевая стабилизация) или по касательной (вихревая стабилизация). Завихрение газа обеспечивается конструкцией корпуса плазматрона.

Большое распространение получили плазматроны с фокусирующим потоком газа (рис. 4.22в). Фокусирующий газ подается по наружному соплу под углом к оси плазматрона горелки и, охватывая столб дуги, интенсивно охлаждает его. Благодаря этому происходит некоторое уменьшение сечения столба дуги и достигается высокая концентрация потока при сравнительно малой скорости истечения газа. Такие плазматроны, называемые иглоплазменными или микроплазменными, позволяют получить концентрированную плазму при малых токах (0,5...30 А).

Источники электропитания плазматронов для сварки выполнены на базе сварочных выпрямителей с падающими внешними вольт-амперными характеристиками (ВАХ) и повышенным напряжением холостого хода (до 80 В).

Система управления включает в себя пульт и при необходимости шкаф управления, в которых размещены устройство зажигания дуги (или осцилляторы),

регуляторы расхода газа, электроблокировки, отсекатели и другие элементы водяных и газовых коммуникаций, коллектор кабель-шлангового пакета плазмотрона, разъем электрокабеля для подключения к источнику питания. На пульте расположены приборы контроля и регулирования параметров плазменного процесса. В установках для ручных плазменных процессов пульт управления чаще всего встроен в корпус источника питания, а в установках для механизированных процессов вмонтирован в панель управления установок.

Кабель-шланговый пакет обеспечивает подвод к плазмотрону электрического тока, охлаждающей воды, рабочего и защитного газов и стыкуется с плазмотроном либо внутри рукоятки ручного плазмотрона, либо посредством штуцерных соединений, расположенных в верхней части плазмотрона, предназначенного для механизированной сварки.

4.6. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

Лазерная сварка в промышленности осуществляется с помощью лазерных технологических установок. В их состав входят, как правило, технологический лазер, системы транспортирования и фокусировки излучения и защиты зоны шва, а также механизмы крепления и перемещения свариваемого объекта.

Для сварки применяют два типа технологических лазеров: газовые и твердотельные.

Газовые лазеры. В них активной средой являются чистый газ, смесь нескольких газов или газа с парами металла, возбуждаемая электрическим разрядом, химическими реакциями или при адиабатическом сверхзвуковом истечении нагретого газа через сопло. В соответствии с этим различают газовые электроразрядные, химические и газодинамические лазеры.

Наибольшее распространение получили электроразрядные CO_2 -лазеры, в которых используются нижние колебательные уровни возбужденных молекул CO_2 для инфракрасного излучения с длиной волны 10,6 мкм. Газ возбуждают электрическим разрядом. Электрический КПД CO_2 -лазера составляет 5...15%.

Для повышения эффективности генерации излучения молекул углекислого газа в большинстве CO_2 -лазеров используется газовая смесь с различным процентным содержанием CO_2 , N_2 и He. Добавка N_2 в рабочую газовую смесь способствует усилению генерации излучения, а He интенсифицирует отвод теплоты во время генерации вследствие высокой теплоемкости и теплопроводности, понижая температуру рабочей смеси.

Для увеличения эффективности использования газовой смеси необходимо не допускать ее перегрева. С этой целью рабочую смесь охлаждают либо за счет отвода теплоты от разрядной трубки (CO_2 -лазеры с диффузионным охлаждением рабочей смеси — медленная прокачка), либо при циркуляции рабочей смеси и замене нагретых объемов (CO_2 -лазеры с конвективным охлаждением — быстрая прокачка).

Медленная прокачка применяется в трубчатых однолучевых лазерах со сравнительно малой мощностью и в многолучевых лазерах. Однако излучение

лазеров с диффузионным охлаждением отличается повышенной расходимостью из-за наличия большого числа поворотных зеркал и многомодового характера излучения. Поэтому при фокусировке излучения максимальные значения плотности мощности ограничены ($10^4 \dots 5 \times 10^5$ Вт/см²).

В лазерах с быстрой прокачкой достигаются более высокие мощности излучения (> 1 кВт). По направлению газового потока относительно электродов газоразрядной камеры и зеркал резонатора различают лазеры с продольной прокачкой и лазеры с поперечной прокачкой. Возбуждение рабочей газовой смеси осуществляется разрядом постоянного тока, высокочастотным разрядом или разрядом постоянного тока с импульсной предионизацией.

На рисунке 4.24а, б представлена схема с быстрой продольной прокачкой. Быстрая продольная прокачка смеси осуществляется с высокой скоростью ($v = 120$ м/с) через четыре пары параллельных газоразрядных трубок; при последовательном сложении лучей общая оптическая длина активной среды $L = 1,6$ м. В блоке питания лазера используется трехфазный высоковольтный регулятор переменного напряжения. Модулятор питания позволяет перейти на импульсный режим. Газовакуумная система имеет ручное и автоматическое управление, осуществляющее откачку и напуск смеси за 2 мин. При этом обеспечивается поддержание давления в газовакуумном контуре.

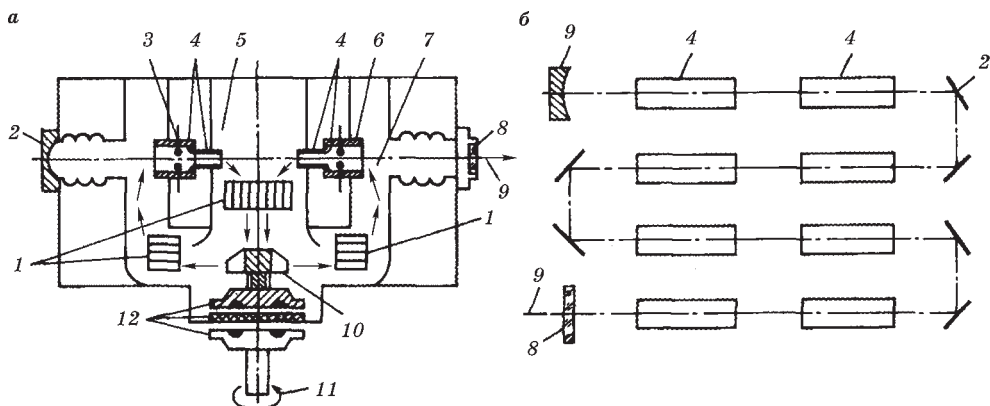


Рис. 4.24

Схема лазера с быстрой продольной прокачкой, используемая в лазерной технологической установке для сварки «Латус-31»:

а — газоразрядная и технологическая схемы; б — оптическая схема; 1 — теплообменники; 2 — зеркала оптического резонатора; 3 — аноды; 4 — кварцевая часть газоразрядной трубки; 5 — катоды (заземленный корпус); 6 — керамическая часть газоразрядной трубки; 7 — направление газового потока; 8 — выводящее окно; 9 — выходящий пучок лазерного излучения; 10 — вентилятор; 11 — привод вентилятора; 12 — магнитная муфта.

Используемые в технологических лазерах оптические резонаторы обеспечивают качество излучения с расходимостью $1 \dots 5$ мрад. Зеркала для резонаторов изготавливают из меди, кремния и других материалов с покрытиями, гарантирующими высокий коэффициент отражения $98 \dots 99,7\%$ для длины волны генерируемого излучения $10,6$ мкм.

Одним из недостатков CO_2 -лазера является то, что в оптических фокусирующих системах требуются линзы из таких дефицитных материалов, как арсенид галлия, германий, селенид цинка и др.

Твердотельные лазеры. В твердотельных лазерах генерация излучения осуществляется в твердом активном элементе, в качестве которого используют стержни из кристалла искусственного рубина, стекла с присадкой редкоземельного элемента неодима, алюмоиттриевого граната с добавкой неодима.

Принципиальная схема твердотельного лазера представлена на рисунке 4.25. Твердый активный элемент 2 размещают в резонаторе между двумя зеркалами 1 и 3. Зеркало 1 полностью отражает все падающее на него излучение, а зеркало 3 является полупрозрачным. Оптическая накачка активной

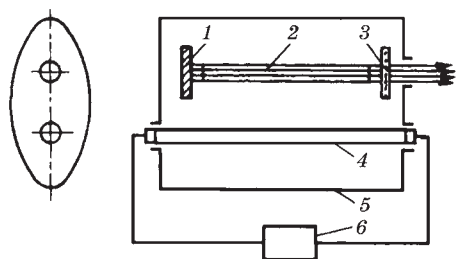


Рис. 4.25
Принципиальная схема
твердотельного лазера

среды осуществляется энергией газоразрядной лампы-вспышки 4 с источником питания 6. Для получения более эффективного облучения лампу 4 вместе с активным элементом 2 помещают в кожух 5, на внутреннюю поверхность которого нанесено отражающее покрытие типа серебра, золота и др. Кожух 5 имеет эллиптическую форму, а лампа и кристалл размещаются в фокусах эллипса. Этим достигаются условия равномерного и интенсивного освещения кристалла.

Твердотельные лазеры с рубиновым стержнем обычно работают в импульсно-периодическом режиме излучения с длительностью импульсов $10^{-3} \dots 10^{-9}$ с на длине волны 0,69 мкм. Энергия излучения в импульсе $10^{-2} \dots 10^{-3}$ Дж при максимальной частоте повторения импульсов ≥ 10 Гц.

Твердотельные лазеры на стекле с неодимом и на гранате с неодимом генерируют излучение на длине волны 1,06 мкм и характеризуются высокой мощностью излучения в импульсе при импульсно-периодическом режиме генерации. Частотный режим твердотельных неодимовых лазеров изменяется в широких пределах: 0,05 Гц...50 кГц. При низких частотах (0,1...1 Гц) эти лазеры способны генерировать энергию в десятки джоулей в импульсе при длительности импульса порядка 100 мкс.

Отличительной особенностью этих лазеров является возможность генерации излучения не только в импульсно-периодическом, но и в непрерывном режиме. Мощность непрерывной генерации достигает 0,5...2,0 кВт и выше. Электрооптический КПД твердотельных лазеров с использованием ламповой накачки активных элементов — 1...3%.

Твердотельные лазеры с диодной накачкой (диодные лазеры) обеспечивают весьма высокие значения электрооптического КПД порядка 30...60%, малые габаритные размеры и небольшую длину волны излучения (порядка 0,8...0,9 мкм).

Более короткая длина волны излучения (1,06 мкм) твердотельных лазеров в отличие от CO_2 -лазера (10,6 мкм) дает возможность применять для

фокусировки линзы из простого оптического стекла. Появляется возможность передачи энергии лазерного излучения по гибким оптоволоконным системам на значительные расстояния (до 100 м) с малыми потерями.

Следует также отметить, что эффективный КПД обработки материалов твердотельным лазером заметно превосходит значения КПД при сварке и в особенности при поверхностной обработке излучением CO_2 -лазера.

Для защиты металла шва при лазерной сварке от окисления используют газовую, флюсовую либо газотрусовую защиту. Газовая защита осуществляется подачей защитного газа через сопло непосредственно в зону воздействия лазерного излучения на материал, подобно дуговой сварке. Специфика лазерной сварки обуславливает применение специальных сопел и составов защитных газов, обеспечивающих как надежную защиту, так и эффективное проплавление. На рисунке 4.26а–г представлены некоторые варианты конструкций сопел, обеспечивающие наряду с защитой расплавленного металла шва также защиту ОШЗ. При сварке со сквозным проплавлением для ряда высокоактивных металлов требуется также защита корня шва.

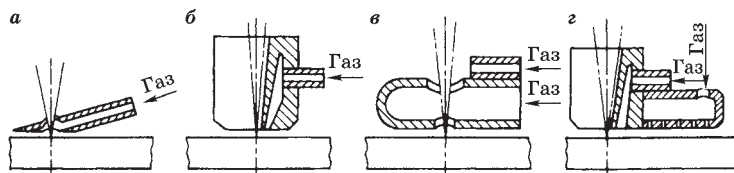


Рис. 4.26
Конструкции защитных сопел

При лазерной сварке в качестве защитных газов могут быть использованы те же газы, что и при дуговой. Однако следует учитывать их различное влияние на экранирующее действие факела, а значит, и на эффективность проплавления. Газы, имеющие более высокие потенциал ионизации и теплопроводность, обеспечивают максимальную эффективность проплавления.

4.7. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

Для создания электронного луча требуется довольно глубокий вакуум, такой, чтобы средняя длина свободного пробега электронов была больше расстояния от катода, где они образуются, до свариваемого изделия.

Оборудование для электронно-лучевой сварки состоит из следующих узлов: вакуумной камеры с системой перемещения деталей; сварочной электронной пушки, создающей электронный луч; источника питания электронной пушки; системы управления установкой.

Вакуумная камера зависит от размеров свариваемого изделия. При этом существенно ограничиваются возможности применения способа вследствие ограничения размеров свариваемых изделий и малой производительности процесса, так как много времени уходит на подготовку деталей к сварке. Поэтому наряду с высоковакуумными установками разрабатывают и такие, где

электронный луч выводится из камеры пушки, в которой поддерживается высокий вакуум, и сварка производится в низком вакууме ($10^{-2} \dots 10^{-1}$ мм рт. ст.). В электронно-лучевых установках используют камеры со сварочными манипуляторами, позволяющими перемещать изделие для получения сварных швов заданной конфигурации. Так как поперечные размеры источника сварочной теплоты (электронного луча) малы, то отклонение свариваемого стыка от оси луча допускается от нескольких микрон до 0,2 мм, а отклонение скорости сварки не должно превышать $\pm 1\%$ от номинального значения. Скорость перемещения луча по детали при сварке (скорость сварки) определяется скоростью перемещения (вращения) самой детали или скоростью отклонения луча.

Электронная пушка в сварочных установках состоит из следующих основных элементов:

- катод — источник электронов;
- анод — электрод с отверстием в середине для пропускания луча к изделию, подключенный к положительному полюсу силового выпрямителя;
- фокусирующий прикатодный электрод (модулятор), регулирующий силу тока в луче;
- фокусирующая магнитная линза;
- отклоняющая магнитная система.

Наиболее распространены комбинированные пушки с электростатической и электромагнитной фокусировкой пучка одновременно (рис. 4.27). В них применяют термоэлектронные катоды, которые обычно изготавливают из тугоплавких металлов (тантала, вольфрама) или из гексаборида лантана.

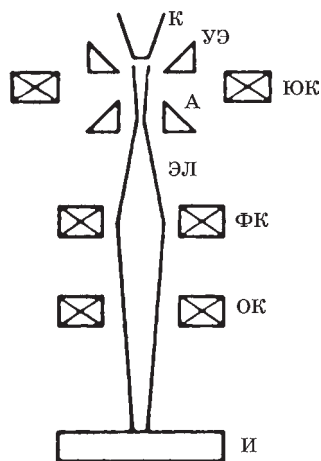


Рис. 4.27
Типичная схема электронно-лучевой пушки:

К — катод; УЭ — управляющий электрод; ЮК — юстирующие катушки; А — анод; ЭЛ — электронный луч; ФК — фокусирующие катушки; ОК — отклоняющие катушки; И — свариваемое изделие.

Конструкции катода уделяется особое внимание, так как условия его работы чрезвычайно тяжелые: высокая температура и интенсивное разрушение под влиянием ионной бомбардировки, а требования к точности и сохранению размеров его при работе очень высокие. От самых незначительных деформаций катода зависят в значительной степени параметры электронного луча. Обычно срок службы катода составляет не более 20 ч непрерывной работы, редко — до 50 ч.

Мощность электронного луча определяется напряжением между катодом и анодом (до 100 кВ) и током луча (до 500 мА) и регулируется путем изменения тока, что в любых электронных пушках достигается изменением температуры нагрева катода. Но такой способ инерционен и неудобен тем, что эта зависимость нелинейная. Новый тепловой режим, а следовательно, и новое значение тока устанавливаются лишь через несколько секунд.

Более распространен метод регулирования тока путем подачи отрицательного (1...3 кВ) относительно катода потенциала на управляющий катод. Скорость установления тока луча при импульсном

открывании электронной пушки составляет примерно 2 мА/мкс. Для импульсного управления током луча в электрической схеме установки предусмотрены специальные электронные схемы, которые вырабатывают сигнал, подаваемый на модулятор. Обычно схема позволяет плавно управлять величиной тока в луче.

Плотность тока в луче можно регулировать, меняя диаметр фокусного пятна на изделии без изменения значения общего тока, используя магнитную линзу. Такая линза представляет собой катушку с током, ось которой совпадает с осью луча. Для повышения эффективности работы ее помещают в ферромагнитный экран. В этом случае магнитное поле концентрируется в узком немагнитном зазоре. Фокусное расстояние линзы — расстояние от середины этого зазора до минимального сечения прошедшего сквозь линзу пучка — определяется конструкцией линзы, анодным напряжением пушки и током, протекающим по обмотке линзы.

Фокусное расстояние линейно зависит от анодного напряжения установки, но не зависит от силы тока в луче. Параметры сварного шва непосредственно зависят от постоянства энергетических характеристик электронного луча, в том числе его диаметра, так как размер последнего определяет удельную мощность луча. Поэтому в электронно-лучевых установках особое внимание уделяется постоянству анодного напряжения. Применяют специальные меры для его стабилизации, что позволяет устранить влияние колебаний напряжения сети, пульсаций силового выпрямителя и т. п.

Отклоняющие системы применяют для установки луча на шов или некоторой корректировки его положения относительно стыка, перемещения луча вдоль оси стыка при выполнении сварного шва, периодического отклонения луча при сварке с поперечными или продольными колебаниями луча и при слежении за стыком во время сварочной операции. Магнитное поле направлено поперек направления движения электронов, а сила, отклоняющая траекторию электрона, действует перпендикулярно оси луча и направлению магнитного поля.

Поскольку электронный пучок при отклонении расфокусируется, то в сварочных установках отклонение его осуществляется на небольшие углы, не более $7...10^\circ$.

При сварке толстолистовых металлов, а также при сварке в промежуточном вакууме неизбежно повышение ускоряющего напряжения, так как этим путем, прежде всего, можно заметно уменьшить рассеяние пучка. Однако повышение ускоряющего напряжения затрудняет совмещение луча со стыком, требует специальной защиты персонала от рентгеновского излучения; аппаратура усложняется.

Все существующие конструкции электронно-лучевых установок можно разделить условно на следующие группы:

- 1) универсальные установки для сварки изделий средних размеров;
- 2) универсальные и специализированные установки для микросварки малогабаритных деталей;
- 3) специализированные установки для сварки изделий малых и средних размеров;

- 4) установки для сварки крупногабаритных изделий с полной их герметизацией;
- 5) установки для сварки крупногабаритных изделий с частичной герметизацией места стыка;
- 6) установки для сварки в промежуточном вакууме.

Установки первой группы предназначены в основном для использования в исследовательских и заводских лабораториях, а также в промышленности при единичном и мелкосерийном производстве. Они имеют вакуумные камеры объемом $0,001...4,0 \text{ м}^3$ и манипуляторы для перемещения свариваемых деталей, позволяющие осуществлять наиболее универсальные перемещения при выполнении сварных швов. Такие установки снабжают также системами наблюдения за областью сварки. Электронная пушка — стационарная или перемещается внутри камеры с целью начальной установки луча на стык.

Установки для сварки крупногабаритных деталей отличаются наличием дорогостоящих вакуумных камер большого объема, куда детали помещаются целиком. Часто электронные пушки, которые имеют гораздо меньшие размеры, чем изделие, размещают внутри камеры. Сварной шов выполняется при перемещении самой электронной пушки. Иногда, особенно при сварке обечаек кольцевыми швами, на камере размещают несколько пушек, позволяющих за счет ликвидации продольного перемещения изделия уменьшить размеры камеры.

Для снижения затрат на оборудование и повышения производительности установок последние выполняют иногда лишь с местным вакуумированием в области свариваемого стыка. Тогда откачиваемый объем сокращается, размеры установки в целом также получаются меньше, чем в том случае, если все изделие помещать в камеру. Иногда, например, при сварке трубопроводов (непосредственно при их укладке), без местного вакуумирования задачу решить не представляется возможным.

В некоторых случаях рабочая камера установки может быть откачана лишь до промежуточного вакуума ($10^{-1}...10^{-2}$ мм рт. ст.). Диффузионный насос для откачки рабочей камеры становится ненужным (для камеры пушки он по-прежнему необходим, но малой мощности и малогабаритный). В таких установках лучепровод, соединяющий камеру пушки с камерой детали, проектируют с учетом создания необходимого перепада давлений между камерами; иногда в лучепроводе предусматривают даже промежуточную ступень откачки.

В электронно-лучевых установках особо большое значение приобретает точность изготовления и сборки свариваемых деталей и слежение за положением луча относительно свариваемого стыка. В системах слежения используют вторичноэмиссионные датчики, сигнал с которых преобразуется и направляет электронный луч на стык с помощью отклоняющих катушек.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что включает в себя оборудование сварочного поста?
2. Какие существуют типы электрододержателей?
3. По каким признакам классифицируются полуавтоматы для дуговой сварки?

4. По каким признакам классифицируются автоматы для дуговой сварки?
5. Назовите основные узлы полуавтоматов и автоматов.
6. Что представляет собой газовая аппаратура для сварки в защитных газах?
7. Какие существуют виды флюсовых аппаратов?
8. Как классифицируют аппараты для электрошлаковой сварки в зависимости от способа крепления и передвижения?
9. Чем отличаются плазматроны прямого и косвенного действия?
10. В каком виде могут быть выполнены катоды в плазматронах?
11. Какие типы технологических лазеров применяют для сварки?
12. Из каких узлов состоит оборудование для электронно-лучевой сварки?

5.1. СВАРКА НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

5.1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При сварке металлов и сплавов, претерпевающих полиморфные превращения, в зонах сварочного нагрева образуются участки с разным фазовым составом. Структура, возникающая при сварке плавлением, является результатом нагрева свариваемого металла источником тепла, реакций металл-газ, металл-флюс в сварочной ванне и формированием химической и физической неоднородностей при охлаждении зоны сварки. Фазовые и структурные превращения определяют свойства сварных соединений.

Фазовые и структурные превращения. *Фазовыми превращениями* называют процессы, связанные с частичной или полной перестройкой кристаллической решетки. К фазовым превращениям относятся кристаллизация — переход жидкого металла в твердое состояние и два вида превращений в твердом состоянии — полиморфные превращения и реакции выделения.

Полиморфные (аллотропические) превращения связаны с изменением величины свободной энергии кристаллической решетки в зависимости от температуры. Устойчивы формы с наименьшим запасом энергии. Свободная энергия α — железа с объемно-центрированной кубической (ОЦК) решеткой меньше свободной энергии γ — железа, имеющего гранецентрированную кубическую (ГЦК) решетку, при температурах выше 1392°C и ниже 911°C . В интервале $911...1392^{\circ}\text{C}$ меньшей свободной энергией обладает ГЦК решетка железа. Поэтому при нагреве выше температуры 911°C происходит $\alpha \rightarrow \gamma$ превращение, а при температуре более 1392°C — $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение. Высокотемпературную ОЦК модификацию железа часто обозначают Fe δ . Полиморфные превращения свойственны таким металлам как железо, титан, цирконий, кобальт, бериллий. Движущей силой полиморфных превращений является различие в уровнях свободных энергий кристаллических модификаций решетки при различных температурах.

Реакции выделения характерны для сплавов на основе железа, алюминия, меди, никеля, титана и других металлов, легированных элементами с высокой растворимостью в металле при больших температурах, но выделяющимися из твердого раствора при снижении температуры в виде новых фаз с кристаллической решеткой, отличающейся от решетки основы сплава.

В полиморфных превращениях и в реакциях выделения процесс превращения определяется зарождением новой фазы и миграцией границ между соседними фазами. Возможны два механизма образования и роста новой фазы. При первом — диффузионном — атомы совершают термически активируемые переходы через поверхность раздела, отрываясь от решетки одной фазы (исчезающей) и присоединяясь к решетке другой фазы (растущей). При втором — бездиффузионном — новая фаза возникает в кристалле основы путем скорректированного сдвигового движения всех атомов поверхности раздела на расстояния, меньшие межатомных.

Структурными превращениями при сварке называют все изменения физического и химического состава металла при сварочном нагреве, которые не сопровождаются изменением его кристаллической решетки. В первую очередь это процессы возврата и рекристаллизации.

Возвратом называют изменения свойств, происходящие в деформированном металле: снижение остаточных напряжений, возникших при обработке металла давлением, снятие деформационного упрочнения и восстановление пластичности. Температура возврата $\leq 0,4 T_{\text{пл}}$ ($T_{\text{пл}}$ — температуры плавления).

Рекристаллизацией называют изменение формы и размеров зерен основного металла, деформированных прокаткой или другой механической обработкой. Рост зерен происходит путем обмена атомов по границам зерна, является процессом диффузионным, термически активируемым и начинается при температурах $0,4 \dots 0,5 T_{\text{пл}}$.

Железо со многими элементами образует фазы в виде твердых растворов: с металлами — растворы *замещения*, с углеродом, азотом, водородом — растворы *внедрения*. Растворимость углерода в железе зависит от кристаллической формы железа и в α -железе ничтожно мала (менее 0,02%), а в γ -железе в 100 раз больше (до 2%). Твердый раствор углерода в α -железе называют *ферритом* и обозначают F , α или Fe_α , в γ -железе — *аустенитом* (A , γ или Fe_γ (c)). Одной из причин различий в растворимости углерода в аустените и феррите считают несоответствие диаметра атома углерода (в свободном состоянии равного 0,154 нм) и межузельных пор в ОЦК и ГЦК решетках. В ОЦК решетке в середине ребер куба имеется 12 свободных мест (пор) диаметром 0,063 нм, в два раза меньшем диаметра атома углерода. В ГЦК решетке пора в центре имеет диаметр 0,102 нм, и атом углерода помещается в ней, вызывая лишь небольшое увеличение решетки.

Помимо твердых растворов в системе Fe—C существует химическое соединение — карбид Fe_3C , называемый *цементитом* (Ц). Так как растворимость углерода в α -железе очень низка, во многих случаях структура стали состоит из феррита и высокоуглеродистых фаз в виде цементита и других карбидов. Температура плавления цементита $\sim 1250^\circ\text{C}$. Цементит имеет высокую твердость ($> 800 \text{ НВ}$) и практически нулевую пластичность. В кристаллической решетке цементита атомы углерода могут замещаться азотом и кислородом, атомы железа — другими металлами: марганцем, хромом, ванадием, титаном и др.

Полиморфные превращения сплавов системы Fe—C позволяют изменять структуру при термической обработке этих сплавов. Выделим основные критические точки превращений (температуры фазовых переходов) и виды термических обработок углеродистых сталей.

Нижняя критическая точка A_1 находится на линии PSK, а *верхняя критическая точка* A_3 — на линии GSE диаграммы состояния Fe–C. Для обозначения критических точек при нагреве применяют символ c (A_{c1} , A_{c3}); при охлаждении — символ r (A_{r1} , A_{r3}).

При охлаждении A_{r3} соответствует началу выделения феррита или цемента из аустенита, а A_{r1} — окончанию этого процесса. При нагреве процесс превращения феррита в аустенит начинается выше A_{c1} , а в точке A_{c3} завершается растворение феррита или цемента в аустените.

Отжиг — термическая обработка, вызывающая фазовую перекристаллизацию, происходящую при нагреве стали выше A_{c3} и последующем медленном охлаждении. При отжиге состояние стали приближается к равновесному, структура стали после отжигов: феррит с перлитом, перлит или перлит с цементитом. Если после нагрева выше A_{c3} сталь охлаждают на воздухе, то такую термообработку называют *нормализацией*.

Закалка — нагрев стали выше критической точки A_{c3} с последующим быстрым охлаждением. Если скорость охлаждения так велика и переохлаждение столь значительно, что углерод не успевает выйти из твердого раствора $Fe_\gamma(C)$, аустенит превращается в *мартенсит* — пересыщенный твердый раствор углерода в феррите $Fe_\alpha(C)$.

Неполная закалка — термическая обработка, при которой нагрев проводят до температур выше A_{c1} , но ниже A_{c3} , в результате в структуре стали сохраняется доэвтектоидный феррит или заэвтектоидный цементит.

Отпуск — нагрев закаленной стали ниже A_{c1} . В результате такого нагрева снижаются остаточные напряжения в стали; возможно также развитие процессов старения мартенсита или выделения карбидных фаз из пересыщенного твердого раствора углерода в решетке α -Fe.

5.1.2. ОСНОВНЫЕ СТРУКТУРНЫЕ ЗОНЫ В СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ

Сварные соединения, выполненные сваркой плавлением, состоят из трех зон: *литого металла* сварного шва; *зоны термического влияния* (околошовной зоны) — основного металла, подвергнувшегося тепловому влиянию сварки; *основного металла*, не испытавшего такого влияния. Границу между металлом сварного шва и околошовной зоны называют *линией плавления*.

Сварной шов формируется на подложке из оплавленных кромок основного металла. При затвердевании жидкого металла сварочной ванны образуются зерна металла — *кристаллиты*. В результате конкурентного роста часть кристаллитов исчезает, поперечное сечение оставшихся кристаллитов, прорастающих в глубь сварочной ванны, становится больше и в сварном шве возникает *зона столбчатой кристаллизации*. Чем больше переохлажден расплав перед фронтом кристаллизации, тем более вероятны зарождение и рост так называемых «свободных» кристаллитов с хаотической ориентацией, и, соответственно, уже зона столбчатых кристаллитов и меньше их размер. Измельчение зеренной структуры в шве, обеспечивающее повышение механических свойств металла, достигают различными приемами, в том числе снижением погонной энергии сварки, применением теплоотводящих устройств, введением в сварочную ванну модификаторов, являющихся центрами кристаллизации.

Протяженность *зоны термического влияния* и характер структурных превращений в ней зависят от состава и теплофизических свойств металла, способа и режима сварки, типа сварного соединения. В процессе сварки каждая точка зоны термического влияния имеет различную максимальную температуру нагрева и разное время пребывания при повышенных температурах, поэтому различные участки зоны термического влияния отличаются по структуре и свойствам.

Структура *основного металла* определяется технологической обработкой заготовок перед сваркой. Заготовки могут быть в виде проката в состоянии нагартовки или отпуска и отливок или поковок с литой или деформированной структурой. Термическая обработка металла заготовок также определяет структуру и свойства основного металла.

5.1.3. ФОРМИРОВАНИЕ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ХИМИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

Наряду с неоднородностью зеренной структуры металлу сварных соединений свойственна химическая неоднородность в виде локальных участков с повышенной концентрацией легирующих добавок или примесей — *сегрегаций*.

Химическая неоднородность металла сварного шва обусловлена неравновесными условиями кристаллизации, когда процессы затвердевания и последующего охлаждения опережают по скорости процессы конвективного или диффузионного выравнивания состава жидкой сварочной ванны и выравнивающей диффузии в твердой фазе.

Результатом такого затвердевания расплава является *нормальная сегрегация* или увеличение концентрации примеси в направлении затвердевания. Наибольшее количество примеси скапливается в центре сварных швов, где встречаются растущие навстречу друг другу кристаллиты. В результате при кристаллизации сварочной ванны с узким, глубоким проплавлением по оси шва, в месте стыка кристаллитов образуется область повышенной дефектности, в которой скапливаются примеси и включения. При затвердевании широкой сварочной ванны с небольшим проплавлением кристаллиты вытесняют примеси, концентрирующиеся перед фронтом кристаллизации, на поверхность шва в шлаки.

Одновременно в металле сварных швов формируется микроскопическая *ячеистая и дендритная сегрегация*. Степень развития ячеисто-дендритной химической неоднородности определяется скоростью охлаждения и составом сплавов. При малых скоростях охлаждения неоднородность уменьшается за счет диффузионного выравнивания, а при больших — за счет развития бездиффузионного процесса кристаллизации или механического захвата примеси. Уменьшение степени химической неоднородности в сварных швах при увеличении скоростей охлаждения связано с измельчением элементов ячеисто-дендритной структуры, в результате которого состав литого металла усредняется.

Помимо названных видов сегрегации, в сварных швах наблюдается *распределение примесей слоями*, повторяющими форму изотерм. Это явление вызвано изменением скорости роста кристаллитов и особенно выражено при

использовании импульсных источников теплоты, когда происходит периодическое плавление и затвердевание сварочной ванны.

Химическая неоднородность металла зоны термического влияния меньше, чем литого металла шва, поскольку изменение размеров зерна при рекристаллизации не вызывает существенного перераспределения легирующих элементов и примесей. Основной вид химической неоднородности в этой зоне — накопление примесей или легирующих добавок по границам зерен вследствие адсорбции и преимущественной диффузии растворенных атомов вдоль границ. Кроме того, вблизи границы сплавления наблюдается диффузионное проникновение некоторых элементов из расплавленного металла сварочной ванны в твердый основной металл. Ширина зоны диффузионного проникновения достигает 0,1...0,4 мм. Изменение состава в этом участке может быть вызвано преимущественным плавлением металла по границам зерен, выходящим к сварочной ванне, и проникновением по этим каналам металла из сварочной ванны в основной металл.

Другая причина неоднородности металла вблизи границы сплавления — диффузия элементов из твердой фазы в жидкую ванну, где большинство легирующих добавок и примесей лучше растворяется. В процессе охлаждения после полного затвердевания сварочной ванны возможно некоторое диффузионное выравнивание состава в этом участке.

5.1.4. ОСНОВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛЯХ

Из равновесной диаграммы состояния Fe—C и вариантов термической обработки, связанных с фазовыми превращениями, следует, что в углеродистых сталях существуют следующие структуры: *аустенит* (А) — твердый раствор углерода в γ -железе $Fe_\gamma(C)$; *феррит* (Ф) — твердый раствор углерода в α -железе Fe_α ; *мартенсит* (М) — пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе $Fe_\alpha(C)$; *перлит* (П) — эвтектоидная смесь из одновременно образующихся феррита и цементита $Fe_\alpha + Fe_3C$.

Переход от одной основной структуры в другую осуществляется при *четырёх основных фазовых превращениях*. Рассмотрим эти превращения подробнее.

Превращение перлита в аустенит $Fe_\alpha + Fe_3C \rightarrow Fe_\gamma(C)$ происходит при нагреве выше точки A_{c1} — температуры стабильного равновесия аустенит–перлит, — когда из трех основных структур минимальной свободной энергией обладает аустенит (рис. 5.1).

Превращение аустенита в перлит $Fe_\gamma(C) \rightarrow Fe_\alpha + Fe_3C$ протекает ниже температуры A_{c1} при некотором переохлаждении, когда разность свободных энергий $\Delta F_1 = F_{\text{П}} - F_{\text{А}}$ достигает величины, достаточной для образования зародышей новых фаз, входящих в перлит. Однако при снижении температуры уменьшается скорость диффузии углерода (D), необходимая для роста новых фаз: феррита Fe_α и цементита Fe_3C . Таким образом, скорость распада аустенита V определяют два конкурентных фактора — разность свободных энергий ΔF_1 и скорость диффузии углерода D (рис. 5.2). С увеличением переохлаждения скорость превращения возрастает, а затем снижается, когда скорость диффузии углерода уменьшается.

На основании изменения скорости распада аустенита V (см. рис. 5.2) могут быть построены диаграммы изотермического распада аустенита (рис. 5.3).

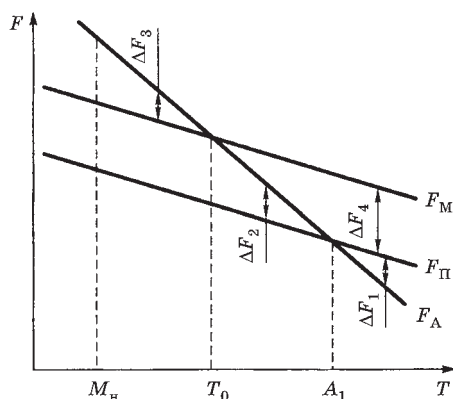


Рис. 5.1
Изменение свободной энергии
аустенита (F_A), мартенсита (F_M)
и перлита ($F_П$) в зависимости от
температуры:

$\Delta F_1, \Delta F_2, \Delta F_3, \Delta F_4$ — разность свободных энергий перлита и аустенита, аустенита и перлита, аустенита и мартенсита, мартенсита и перлита соответственно; M_n — температура начала мартенситного превращения; T_0 — температура метастабильного равновесия системы аустенит-мартенсит; A_1 — нижняя критическая температура превращения аустенит-перлит на диаграмме состояния системы Fe-C.

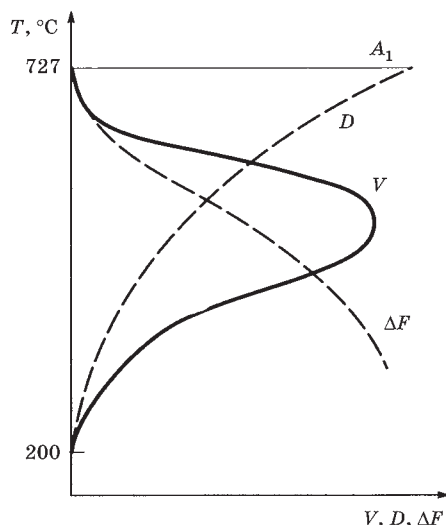


Рис. 5.2
Скорость распада аустенита V
в зависимости от степени
переохлаждения:

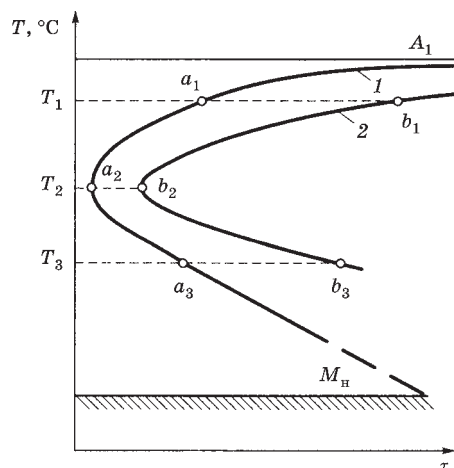
ΔF — разность свободных энергий аустенита и перлита; D — скорость диффузии углерода; A_1 — нижняя критическая температура превращения аустенит-перлит на диаграмме состояния системы Fe-C.

Процесс превращения аустенита в перлит, как диффузионный, развивается во времени, поэтому серия точек a_i и b_i образуют на этой диаграмме две кривые, соответствующие началу и концу превращения при различном переохлаждении. Часто эти кривые по форме называют С-образными кривыми превращения.

Начальный период, называемый *инкубационным*, характеризуется малой скоростью превращения. Максимум скорости превращения наблюдается при

Рис. 5.3
Диаграмма изотермического
превращения аустенита:

1 — кривая, соответствующая началу превращения; 2 — кривая, соответствующая окончанию превращения; a_1-a_3 — точки кривой начала превращения; b_1-b_3 — точки кривой окончания превращения; T_1-T_3 — температуры фазового превращения аустенит-перлит; A_1 — нижняя критическая температура превращения аустенит-перлит на диаграмме состояния системы Fe-C; M_n — температура начала мартенситного превращения; τ — продолжительность охлаждения.



образовании примерно 50% перлита. Отрезок от оси ординат до кривой 1 является мерой неустойчивости аустенита при данной температуре. Кривая 2 соответствует полному превращению аустенита в перлит. Инкубационный период и длительность полного превращения аустенита в перлит минимальны при температуре T_2 (500...600°C).

Свойства и строение продуктов превращения аустенита зависят от температуры, при которой происходит этот процесс. При высоких температурах и малых степенях переохлаждения образуется грубая смесь феррита и цементита — *перлит*. При более низких температурах превращения дисперсность ферритной и цементитной составляющих возрастает, твердость продуктов распада повышается. Такой перлит называют *сорбитом*. С ростом переохлаждения дисперсность возрастает и формируется структура с пластинчатым строением продуктов распада, называемая *троостит*.

Образующаяся ниже изгиба С-образных кривых (см. рис. 5.3) игольчатая структура носит название *бейнит*. Бейнитное превращение аустенита проходит в интервале температур ниже перлитного и выше мартенситного интервала превращений, поэтому его иногда называют промежуточным.

В аустените, переохлажденном до температур ниже T_3 , в результате диффузионного перераспределения углерода появляются участки аустенита с большим и меньшим содержанием углерода. Эта концентрационная неоднородность приводит к возникновению напряжений, под действием которых возможна микропластическая деформация в участках аустенита с малым содержанием углерода, температура начала мартенситного превращения которых M_n лежит выше температуры T_3 . В итоге на этих участках происходит мартенситное превращение $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha(C)$.

Следовательно, распад аустенита при бейнитном превращении проходит по бездиффузионному механизму, но подготавливается диффузионными процессами в аустените и имеет черты, характерные и как для перлитного так и для мартенситного превращений.

Превращение аустенита в мартенсит: $Fe_\gamma(C) \rightarrow Fe_\alpha(C)$. Это превращение наблюдается при быстром охлаждении ниже температуры T_0 — метастабильного равновесия аустенит — мартенсит (см. рис. 5.1). При T_0 наименьший уровень свободной энергии F и, следовательно, наибольшая устойчивость характерна для перлита, однако работа образования мартенсита из аустенита меньше, чем образования перлита. Мартенситное превращение — бездиффузионное и происходит за счет кооперативного сдвига атомов на расстояния меньше межатомных. Концентрация углерода в мартенсите такая же, как и в исходном аустените, поэтому кристаллическая решетка Fe_α искажается вследствие насыщения феррита углеродом и приобретает тетрагональность, т. е. неравенство вертикальной c и горизонтальной a осей куба. Искажение происходит за счет внедрения атомов углерода в междоузлия ОЦК-решетки. Чем больше содержание p углерода в мартенсите, тем больше тетрагональность:

$$c/a = 1 + 0,046p.$$

Мартенситное превращение начинается при температуре M_n , которая зависит от состава стали. Количество остаточного аустенита возрастает при

увеличении содержания углерода и легирующих элементов и понижении температуры M_n .

Превращение мартенсита в перлит $Fe_\alpha(C) \rightarrow Fe_\alpha + Fe_3C$ происходит при всех температурах ниже T_0 , так как свободная энергия перлита ниже свободной энергии мартенсита (см. рис. 5.1). По этой же причине невозможно превращение перлита в мартенсит.

Скорости охлаждения оказывают сильное влияние на фазовые превращения в углеродистой стали. На рисунке 5.4 на диаграмму изотермического превращения нанесены кривые скоростей охлаждения, величина которых $W_1 < W_2 < W_3 < W_4 < W_5$. Кривые соответствующие малым скоростям охлаждения, пересекают С-образные кривые в точках $a_1...a_3$ и $b_1...b_3$. При этих температурах продуктом превращения является перлит различной степени дисперсности и твердости. Все скорости, большие W_k (W_k — касательная к С-образной кривой начала превращения), приводят к образованию мартенсита. Минимальная скорость охлаждения, необходимая для превращения аустенита в мартенсит, называется *критической скоростью заковки*. Эта скорость может быть рассчитана по формуле

$$W_k = (A_1 - T_{\min}) / 1,5\tau_{\min},$$

где T_{\min} — температура минимальной устойчивости аустенита; τ_{\min} — минимальная длительность до начала распада аустенита (коэффициент 1,5 при τ_{\min} учитывает увеличение длительности инкубационного периода распада при непрерывном охлаждении).

Особенностью полиморфных превращений является изменение размеров зерен в процессе нагрева и охлаждения в зависимости от температуры и времени выдержки. При превращении перлит \rightarrow аустенит на межфазных границах феррит-цементит образуется большое число мелких зерен аустенита. Если исходная структура стали — крупнозернистый перлит, то нагрев выше критической температуры A_1 , но ниже $1000...1100^\circ C$ приводит к образованию мелкозернистого аустенита, при распаде которого образуется мелкозернистый перлит. Дальнейший нагрев выше температур $1000...1100^\circ C$ приводит к росту аустенитных зерен, так как

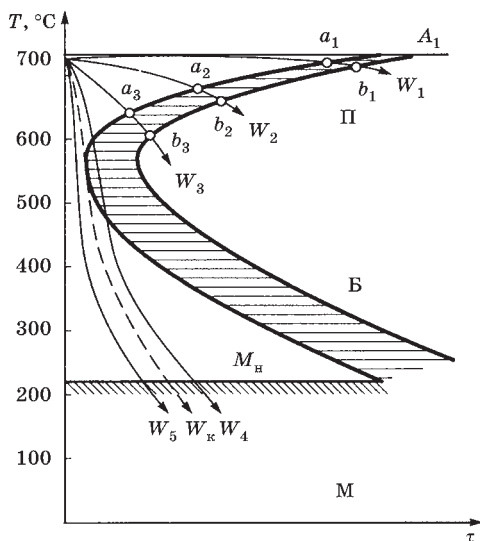


Рис. 5.4

Диаграмма изотермического превращения аустенита с кривыми охлаждения:

a_1-a_3 — точки кривой начала превращения; b_1-b_3 — точки кривой окончания превращения; W_1-W_5 — скорости охлаждения; W_k — скорость охлаждения касательная к кривой начала превращения; A_1 — нижняя критическая температура превращения аустенит-перлит на диаграмме состояния системы Fe-C, M_n — температура начала мартенситного превращения; П — перлит (150...250 НВ); Б — бейнит (400 НВ); М — мартенсит (600 НВ).

происходит растворение тугоплавких частиц или фаз (карбидных, нитридных), тормозящих миграцию границ, зерен. Перлит, образовавшийся при распаде крупнозернистого аустенита, будет соответственно крупнозернистым (рис. 5.5).

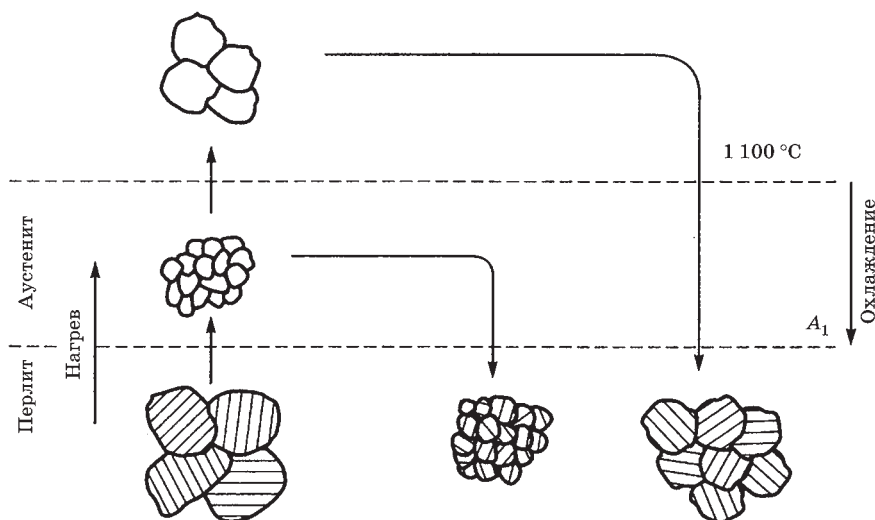


Рис. 5.5

Схема изменения размера зерна перлита в зависимости от температуры нагрева в аустенитной области:

A_1 — нижняя критическая температура превращения аустенит–перлит на диаграмме состояния системы Fe–C.

Таким образом, благодаря полиморфным превращениям можно достичь измельчения структуры сталей за счет правильно выбранных режимов фазовой перекристаллизации (термообработки).

5.1.5. ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СВАРИВАЕМОСТЬ СТАЛИ

При сварке низкоуглеродистой стали в околошовной зоне, нагреваемой от температуры окружающей среды до температуры плавления, образуются следующие участки: неполного расплавления, перегрева, нормализации, неполной перекристаллизации, рекристаллизации, возврата и старения (рис. 5.6).

Участок неполного расплавления примыкает непосредственно к сварному шву и является переходным от литого металла шва к основному. Он представляет собой узкую область (0,1–0,4 мм) основного металла на границе сплавления, нагреваемую до частичного оплавления границ зерен.

Участок перегрева — область основного металла, где максимальные температуры при нагреве были выше 1100°C , а после охлаждения ниже A_{c1} на базе крупно-зернистого аустенита образовалась крупнозернистая ферритно-перлитная (или даже мартенситная) структура с пониженными механическими свойствами (низкая пластичность).

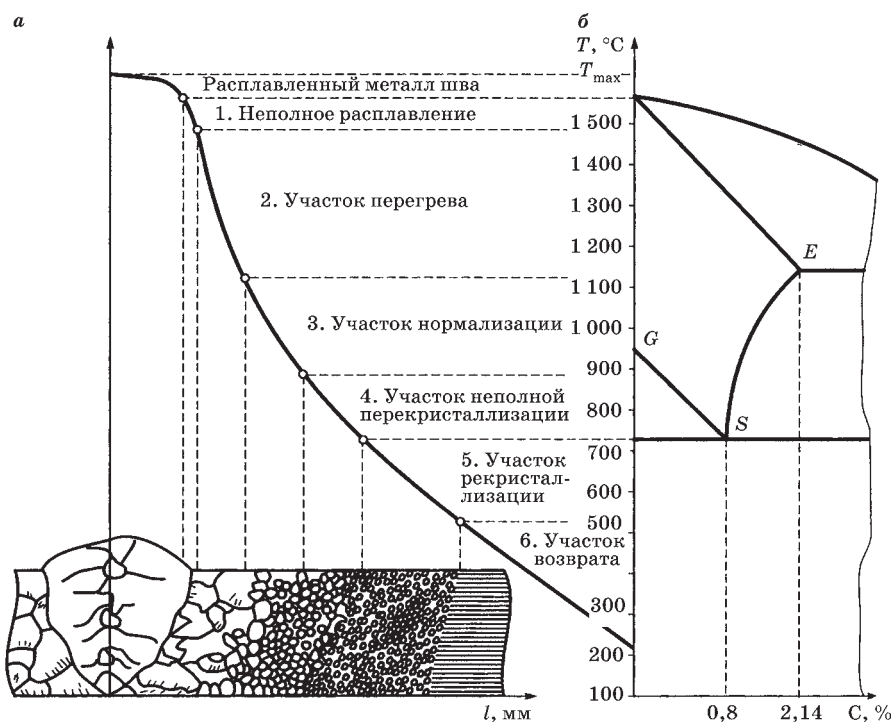


Рис. 5.6

Структура низкоуглеродистой стали в зоне сварки (а) и фрагмент диаграммы состояния железо-углерод (б): T_{\max} — максимальная температура нагрева расплавленного металла; l — расстояние от оси шва; G, S, E — характерные точки диаграммы

Участок нормализации соответствует нагреву в аустенитную область до температур $900...1100^\circ\text{C}$ и перекристаллизации при охлаждении ниже A_1 в мелкозернистую ферритно-перлитную структуру. Металл участка нормализации обладает высокими механическими свойствами, так как фазовое превращение проходит на базе мелкозернистого аустенита, не подвергшегося перегреву.

Участок неполной перекристаллизации нагревается в пределах температур $724...880^\circ\text{C}$. В связи с недостаточной длительностью и температурой нагрева структура металла состоит из смеси мелких перекристаллизованных зерен и крупных исходных зерен феррита и перлита. Механические свойства металла этого участка хуже, чем участка нормализации.

Участок рекристаллизации наблюдается при сварке сталей, подвергавшихся пластической деформации (при прокатке, ковке, штамповке). При нагреве в интервале температур $450...727^\circ\text{C}$ в этой области основного металла развиваются процессы роста зерна, огрубления (сфероидизации) перлитной структуры и разупрочнения металла.

В участке, нагреваемом в интервале температур $100...450^\circ\text{C}$, могут протекать процессы возврата и старения мартенситной составляющей с выделением карбидов и нитридов железа.

Металл околошовной зоны характеризуется не только неоднородностью фазового состава и структуры, но и неоднородностью механических свойств. Ширина околошовной зоны зависит от толщины металла, способов и режимов сварки. Получение заданного уровня свойств в этой зоне определяется скоростью охлаждения W_0 стали в интервале превращения аустенит \rightarrow перлит.

Обеспечение скоростей охлаждения в околошовной зоне ниже предельно допустимой скорости — главная задача при выборе тепловых режимов сварки сталей и сплавов с полиморфными превращениями.

Для определения допустимой скорости охлаждения $W_{\text{доп}}$ существует ряд методик, предусматривающих имитацию термических циклов сварки, например за счет пропуска тока по стержневому образцу по заданной программе. Затем определяют структуру и механические свойства образца и строят диаграммы в координатах «механические свойства или структура — скорость охлаждения» (рис. 5.7).

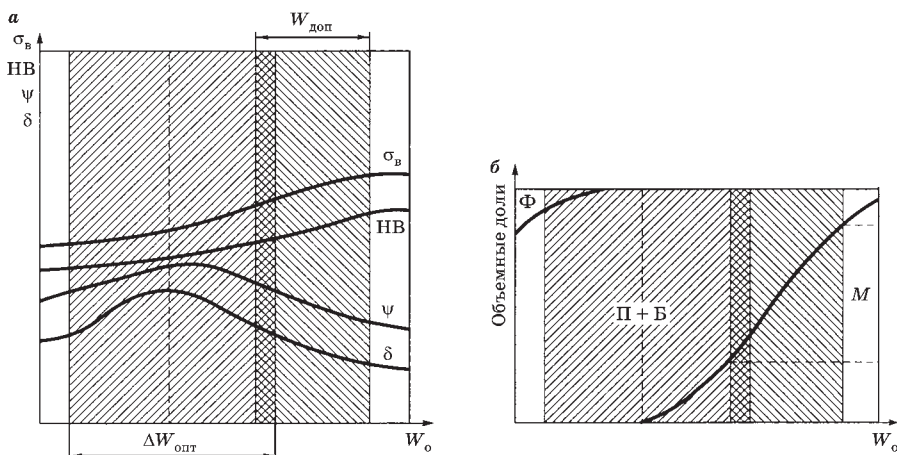


Рис. 5.7

Механические свойства (а) и структура (б) низкоуглеродистых сталей в околошовной зоне в зависимости от скорости охлаждения W_0 ниже температуры A_1 : σ_b — предел прочности; НВ — твердость по Бринеллю; ψ — относительное сужение образца; δ — относительное удлинение образца; $W_{\text{доп}}$ — предельно допустимая скорость охлаждения; $\Delta W_{\text{опт}}$ — интервал скоростей охлаждения, обеспечивающих оптимальные механические свойства материала; Ф — феррит; П — перлит; Б — бейнит; М — мартенсит.

Уменьшение объемной доли перлита и соответствующее увеличение доли закалочных (мартенситных) составляющих при увеличении W_0 приводит к росту показателей прочности (σ_b , НВ) и снижению характеристик пластичности (δ , ψ). Существует интервал скоростей охлаждения ($\Delta W_{\text{опт}}$), в котором обеспечиваются оптимальные механические свойства материала. Для низкоуглеродистых, низколегированных сталей считаются приемлемыми скорости охлаждения в околошовной зоне, при которых образуется не более 20% мартенсита. Такую скорость считают предельно допустимой.

Если при обычных режимах сварки не удастся обеспечить скорости охлаждения ниже допустимых ($W_{\text{доп}}$), то необходимо применение специальных

технологических приемов (предварительный или сопутствующий подогрев, сварка короткими участками, каскадом, горкой).

Эти технологические приемы влияют на скорость охлаждения W_o и характер полиморфного превращения при сварке, позволяют избежать образования закалочных структур или уменьшить их объемное содержание в структуре и сократить ширину зон в сварном соединении, где возможно образование структур закалки. Если требование равнопрочности сварных соединений основному металлу является обязательным условием изготовления сварной конструкции, а технологические приемы, осуществляемые в процессе сварки, оказываются недостаточными для его выполнения, то после сварки проводят полную термическую обработку сварной конструкции.

5.1.6. КЛАССИФИКАЦИЯ СТАЛЕЙ

По *структуре металла* различают три основных класса сталей, отличающихся кинетикой распада аустенита: 1) перлитный, 2) мартенситный, 3) аустенитный.

Структурный класс сталей определяют после *нормализации*, или охлаждения, на спокойном воздухе образцов небольшого размера, нагретых до температур аустенитной области.

По мере увеличения концентрации легирующих добавок устойчивость аустенита в перлитной области возрастает, а точка M_n понижается, что показано на диаграммах изотермического распада аустенита (рис. 5.8).

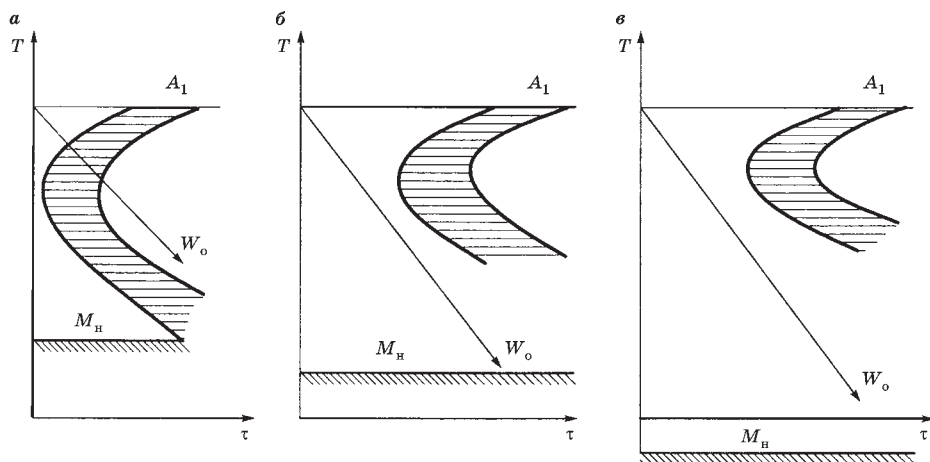


Рис. 5.8

Диаграмма изотермического распада аустенита для сталей перлитного (а), мартенситного (б) и аустенитного (в) классов:

A_1 — нижняя критическая температура превращения аустенит–перлит на диаграмме состояния системы Fe–C; W_o — скорость охлаждения; M_n — температура начала мартенситного превращения.

В сталях *перлитного класса* кривая скорости охлаждения при нормализации пересекает С-образные кривые начала и конца перлитного превращения, в результате образуются структуры перлит, сорбит, тростит (рис. 5.8а)

В сталях *мартенситного класса* область перлитного превращения сдвинута вправо. Охлаждение на воздухе не приводит к распаду аустенита в перлит. Переохлажденный аустенит ниже M_n превращается в мартенсит (рис. 5.8б).

В сталях *аустенитного класса* дальнейшее увеличение концентрации легирующих добавок и углерода сдвигает С-образные кривые вправо, что приводит к росту τ_{\min} и смещает M_n в область отрицательных температур. В результате сталь, охлажденная на воздухе до комнатной температуры, остается аустенитной (рис. 5.8в).

Рассмотренная классификация является условной. Меняя скорости охлаждения сталей, можно получить те или другие структуры. Так, при закалке сталей перлитного класса получают мартенситные структуры, а при медленном охлаждении мартенситной стали возможно перлитное превращение. Аустенитные стали, охлажденные до минусовых температур, могут приобрести структуру мартенсита.

По *химическому составу* различают стали углеродистые и легированные. Углерод является основным легирующим элементом сталей этой группы и определяет их механические свойства и свариваемость. Содержание углерода в конструкционных углеродистых сталях составляет 0,06–0,9%.

Выпускают углеродистые стали обыкновенные (Ст0–Ст6) и качественные (сталь 10–60).

Обыкновенные стали разделены по степени раскисления на три группы:

- *кипящие* (обозначение — кп), раскисляемые при выплавке только марганцем, с повышенным содержанием серы и фосфора и содержанием кремния менее 0,07%;
- *полуспокойные* (обозначение — пс), раскисляемые марганцем и алюминием;
- *спокойные* (обозначение — сп), раскисляемые марганцем, кремнием и алюминием, с содержанием кремния не менее 0,12%.

Сталь обыкновенного качества (ГОСТ 380-94) поставляют без термической обработки в горячекатаном состоянии. Изготовленные из нее конструкции также не подвергают последующей термической обработке.

Прокат из сталей СтЗпс и СтЗсп имеет гарантированную ударную вязкость при температурах испытаний до -20°C . Примером низкоуглеродистой стали обыкновенного качества, широко используемой в сварных конструкциях, является сталь СтЗ, содержащая 0,14–0,22% С, 0,40–0,65% Мн, 0,12–0,30% Si, с пределом прочности $\sigma = 380\text{--}490$ МПа и относительным удлинением $\delta = 23\text{--}26\%$.

Качественные стали (ГОСТ 1050-88) имеют в составе до 0,8% Мн и пониженное содержание вредных примесей (серы, фосфора) и регламентированы по химическому составу и механическим свойствам. Углеродистую, качественную сталь с нормальным (10, 15 и 20) и повышенным (15 Г и 20 Г) содержанием марганца для изготовления конструкций применяют в горячекатаном состоянии и в меньшем объеме после нормализации или закалки с отпуском (термоупрочнение). Механические свойства этих сталей зависят от термической обработки. Сварные конструкции, изготовленные из этих сталей, для повышения прочностных свойств можно подвергать

последующей термической обработке. В качестве примера углеродистой качественной стали можно назвать сталь 20, содержащую 0,17–0,24% С, 0,35–0,65% Мн, 0,17–0,37% Si с пределом прочности $\sigma_{\text{тв}} = 420$ МПа и относительным удлинением $\delta = 26\%$.

В зависимости от содержания углерода конструкционные углеродистые стали подразделяют на низкоуглеродистые ($C \leq 0,25\%$), среднеуглеродистые ($C = 0,26–0,45\%$) и высокоуглеродистые ($C = 0,46–0,75\%$).

Углеродистые стали марок Ст3Гпс, Ст5Гпс с повышенным содержанием марганца по свариваемости относят к низколегированным конструкционным сталям. Легирующие элементы, вводимые в сталь, образуют с железом, углеродом и другими элементами твердые растворы и химические соединения и повышают механические свойства стали, что позволяет снижать массу конструкций.

Легированными называют стали, содержащие специально введенные элементы для придания стали определенных структуры и свойств. В зависимости от содержания легирующих элементов легированные конструкционные стали разделяют на следующие группы:

1. Низколегированные, в которых содержание одного легирующего элемента не превышает 2%, а суммарное содержание легирующих элементов менее 5%.

2. Среднелегированные, в которых содержание одного легирующего элемента составляет 2–5% при суммарном содержании до 10%.

3. Высоколегированные, в которых содержание одного легирующего элемента более 5%, а суммарное содержание легирующих элементов более 10%.

При сварке углеродистых сталей обеспечение высоких механических свойств сварных соединений, особенно пластичности, и получение заданного уровня свойств определяется скоростью охлаждения W_c стали в интервале превращения аустенит \rightarrow перлит.

Наибольшее влияние на допустимую скорость охлаждения и свариваемость сталей оказывает углерод. Чем выше содержание углерода в стали, тем больше склонность к закалке и образованию трещин, тем труднее обеспечить необходимый уровень свойств в сварном соединении. С увеличением содержания углерода, а также ряда других легирующих элементов свариваемость сталей ухудшается.

Ориентировочным количественным показателем свариваемости сталей известного химического состава является эквивалентное содержание углерода, которое определяют по формуле

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}}{5} + \frac{\text{Ni} + \text{Cu}}{13}.$$

При расчете эквивалента углерода содержание углерода и легирующих элементов берется в процентах.

В зависимости от эквивалентного содержания углерода и связанной с этим склонности к закалке и образованию трещин конструкционные стали делят на четыре группы: хорошо, удовлетворительно, ограниченно и плохо сваривающиеся стали (табл. 5.1).

Классификация сталей по свариваемости

Группа	Свариваемость	$C_{\text{экв}}, \%$	Характеристика условий сварки	Марка сталей
I	Хорошая	Не более 0,25	Свариваются любыми способами без применения особых приемов (подогрев, термическая обработка)	Ст2, Ст3, 10, 15Г, 10Г2, 09Г2, 10Г2С
II	Удовлетворительная	0,25...0,35	Требуется строгое соблюдение режимов сварки, применение специального присадочного материала, тщательная очистка свариваемых кромок, в отдельных случаях — предварительный и сопутствующий подогрев до температуры 100...150°C, термическая обработка	15ГС, 15ХМ, 10ХСНД, 14ХГС, 15ХСНД, 18Г2С, 15ХГСА
III	Ограниченная	0,36...0,45	Требуется подогрев до температуры 250...400°C и отпуск после сварки. Перед сваркой стали подвергают термической обработке. Склонны к образованию трещин при сварке без подогрева	12Х1МФ, 20ХМФА, 15Х1М1Ф, 15Х1М1ФА, 30ХГС, 35Г2, 30ХМ, 10ГН2МФА, 15Х2НМФА
IV	Плохая	Более 0,45	Высокая склонность к появлению трещин в шве и околошовной зоне, несмотря на принятие специальных технологических мер: подогрева, промежуточного отпуска и т. д. Обязательны при сварке подогрев, предварительная и последующая термическая обработка	45Х, 45Г, 40Г2, 40ХС, 40ХМФА, 35ХГСА, 30ХН3А, 40ХН2МА, 36Х2Н2МФА

Стали первой группы ($C_{\text{э}} \leq 0,25$) хорошо свариваются без образования закалочных структур и трещин в широком диапазоне режимов и толщин. Удовлетворительно сваривающиеся стали ($C_{\text{э}} = 0,25...0,35\%$) не склонны к образованию холодных трещин при правильном выборе режимов сварки, однако в ряде случаев при сварке требуется подогрев. Ограниченно сваривающиеся стали ($C_{\text{э}} = 0,36...0,45\%$) склонны к образованию трещин. Возможность регулирования сопротивления образованию трещин за счет изменений режимов сварки этих сталей ограничена, требуется подогрев. Плохо сваривающиеся стали ($C_{\text{э}} > 0,45\%$) весьма склонны к закалке и холодным трещинам. При их сварке требуются подогрев и выполнение специальных технологических приемов, а после сварки необходима термическая обработка.

5.1.7. СВАРКА НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

К низкоуглеродистым конструкционным относятся стали марок Ст3, 10, 20, 15Г, 35Г, 12К, 22К, Ст3С, в которых содержится до 0,25% углерода и постоянные примеси (до 0,8% Mn; 0,35% Si; 0,04% P; 0,05% S), а также имеется некоторое количество остаточного водорода и азота.

Низкоуглеродистые стали хорошо свариваются. Для ответственных сварных конструкций в основном применяют низкоуглеродистые стали обыкновенного качества с гарантируемым химическим составом и механическими свойствами или качественные стали. Технологию их сварки обычно выбирают из условий достижения равнопрочности сварного соединения основному металлу, минимального снижения пластичности и отсутствия в сварном соединении дефектов.

Металл шва при сварке низкоуглеродистых сталей отличается по составу от основного металла более низким содержанием углерода и несколько повышенным содержанием марганца и кремния. Металл околошовной зоны низкоуглеродистых сталей незначительно упрочняется в участке перегрева. Более интенсивно пластичность металла околошовной зоны снижается при многослойной сварке, чем при однослойной, за счет интенсификации процессов старения.

Для снятия сварочных напряжений толстостенные конструкции из низкоуглеродистых сталей могут подвергаться после сварки высокому отпуску. Для выравнивания свойств и улучшения структуры проводят нормализацию (от 900...940°C) с последующим высоким отпуском.

Для сварки низкоуглеродистых сталей применяют ручную дуговую сварку, автоматическую и механизированную сварку под флюсом и в углекислом газе, сварку порошковой проволокой (самозащитной и в углекислом газе), электрошлаковую и в меньшей степени газовую сварку. При сварке трубопроводов часто применяют комбинированные способы сварки. Например, при сварке корневых швов трубопроводов высокого давления используют аргонодуговую сварку неплавящимся электродом, а заполнение разделки — плавящимся электродом.

Ручная дуговая сварка покрытыми электродами металлоконструкций из низкоуглеродистых сталей выполняется электродами типа Э46 с рутиловым покрытием и типа Э42А и Э50А с фтористо-кальциевым покрытием. Для сварки металла толщиной до 5 мм, а также корневых швов при многослойной сварке применяют электроды диаметром не более 3 мм, при толщине металла до 10 мм и более — электроды диаметром соответственно 4 и 5 мм. Сварку угловых швов на металле большой толщины, а также сварку первого слоя многослойных швов (при толщине свариваемого металла свыше 30 мм) рекомендуют проводить с предварительным подогревом свариваемых кромок до температуры 120...150°C во избежание появления горячих трещин.

Сварка под флюсом обеспечивает равнопрочность соединения за счет подбора флюсов и сварочных проволок и выбором режимов и техники сварки. При сварке низкоуглеродистых сталей в большинстве случаев применяют кремне-марганцевые флюсы и низкоуглеродистые электродные проволоки типа Св-08, Св-08А и Св-08ГА, которые обеспечивают высокую стойкость металла швов против образования пор и горячих трещин.

Увеличение доли основного металла в металле шва при сварке без разделки кромок повышает содержание в нем углерода, что может привести к росту прочности и снизить пластические свойства металла шва.

При сварке толстолистовой стали на режимах с малой погонной энергией в околошовной зоне возможно образование закалочных структур с пониженной пластичностью. Для предупреждения охрупчивания увеличивают сечение швов или применяют двухдуговую сварку.

Наиболее распространена автоматическая сварка под флюсом конструкций из низкоуглеродистых сталей проволоками диаметром 4...5 мм на переменном или постоянном токе 700...800 А при напряжении на дуге 30...40 В и скорости сварки 20...30 м/ч.

Сварка в защитных газах широко применяется при изготовлении конструкций из низкоуглеродистых сталей. Используют углекислый газ, а также смеси газов: $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ (до 20%), $\text{Ar} + \text{CO}_2$ (до 25%), $\text{Ar} + \text{O}_2 + \text{CO}_2$ (до 10% O_2 и до 20% CO_2).

Для сварки сталей толщиной до 4 мм, а также поворотных и неповоротных стыков труб в углекислом газе применяют сварочную проволоку типа Св-08ГС, Св-08Г2С диаметром 0,5...1,2 мм, для сварки металла больших толщин, расположенных в нижнем положении, — проволоку диаметром 1,2...2 мм. Силу тока в зависимости от диаметра электродной проволоки выбирают в пределах 60...380 А, напряжение на дуге — 18...35 В при вылете электрода 8...30 мм и расходе газа 0,08...0,35 дм³/с.

При сварке в углекислом газе используют также порошковые проволоки диаметром 2, 2,3 и 3 мм. В первых двух случаях сварочный ток изменяют в пределах от 180 до 500 А при напряжении дуги 25–47 В; при сварке проволокой 3 мм сварочный ток изменяют от 400 до 600 А при напряжении дуги от 25 до 38 В.

Электрошлаковая сварка низкоуглеродистых сталей выполняется с использованием кремне-марганцевых и фтористых флюсов. Выбор электродной проволоки зависит от состава стали. При сварке спокойных сталей с содержанием углерода до 0,15% используют проволоки типа Св-08А и Св-08ГА. Для предупреждения образования газовых полостей и пузырей при сварке кипящих сталей, содержащих мало кремния, рекомендуется электродная проволока, содержащая 0,6–0,85% Si.

При электрошлаковой сварке низкоуглеродистых сталей равнопрочность сварного соединения обеспечивается термообработкой после сварки (отпуск или нормализация и отпуск). Однако ударная вязкость при 20°C металла шва и участка перегрева околошовной зоны меньше ударной вязкости основного металла. Повысить механические свойства сварного соединения при электрошлаковой сварке можно, применяя различные технологические приемы. Введение в шлаковую ванну порошкообразной присадки и сварка с принудительным сопутствующим охлаждением влияет на структуру сварного соединения и увеличивает ударную вязкость.

5.1.8. СВАРКА НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ПЕРЛИТНЫХ СТАЛЕЙ

Низкоуглеродистые низколегированные стали легируют Mn, Si, Ni, Cr, V, Mo и другими элементами, причем их содержание может быть не более 1%. Основными легирующими элементами являются Mn и Si в количестве до 2% каждого. Для повышения коррозионной стойкости в сталь вводят медь (0,3...0,4%). Суммарное количество легирующих элементов в низколегированной стали может достигать 5% при содержании углерода не более 0,23%. К этим сталям относятся 09Г2, 12ГС, 10ХСНД.

Легирование повышает устойчивость аустенита. Кремний и марганец снижают диффузионную подвижность углерода, что уменьшает температуру $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения и увеличивает время до начала превращения.

Таким образом, при скорости охлаждения, соответствующей обычным режимам сварки, вероятность образования мартенсита увеличивается. Кроме того, при малых значениях погонной энергии увеличивается доля мелкодисперсных структур (сорбит–бейнит), в которых больше остаточного углерода в решетке и процессы диффузии не завершены.

При больших значениях погонной энергии рост зерна аустенита в зоне перегрева вызывает образование грубой ферритно-перлитной структуры с низким значением ударной вязкости. В результате пластичность металла сварного соединения и его стойкость против хрупкого разрушения снижаются.

Равнопрочность металла шва основному металлу обеспечивается за счет легирования его элементами, переходящими из основного металла или вводимыми через сварочные материалы. Так как низколегированные стали имеют меньшую стойкость против образования горячих трещин, чем низкоуглеродистые, необходимо применять сварочную проволоку с пониженным содержанием углерода и серы, применять предварительный и сопутствующий подогревы, а также термическую обработку.

Ручная дуговая сварка низколегированных низкоуглеродистых сталей выполняется в основном электродами типа Э42А, Э50А и Э60А с фтористо-кальциевыми покрытиями для предотвращения образования трещин. Подготовка кромок, режимы сварки и порядок выполнения швов практически не отличаются от таковых при сварке низкоуглеродистых сталей. Прихватки выполняются теми же электродами, что и сварку, и полностью переплавляют.

Эти стали поставляют в термообработанном состоянии, что усложняет технологический процесс сварки, так как в околошовной зоне на участке, нагретом выше A_3 , а также на участке рекристаллизации и старения (100...500°C) происходит разупрочнение металла. Поэтому главное — выбор теплового режима сварки. В отличие от низкоуглеродистых сталей, необходимо во многих случаях осуществлять предварительный и сопутствующий подогрев до температур 100...350°C. При этом, чем больше толщина металла и чем больше $S_{эжв}$, тем более высокой должна быть температура подогрева.

Сварку сталей, не упрочненных термической обработкой, следует выполнять короткими участками, а для термоупрочненных сталей рекомендуется применять сварку на проход.

Сварка под флюсом металлоконструкций из этих сталей выполняется под кремнемарганцовистыми флюсами. При выборе проволоки необходимо учитывать состав стали. Для сталей типа ГС, которые работают до -40°C, используют проволоки типа Св-08ГА, Св-10ГА. Для сталей, легированных по типу ХСНД, особенно при работе конструкции в условиях пониженных температур, с целью повышения ударной вязкости необходимо использовать проволоки типа Св-10НМА, Св-08МХ.

Сварка в среде защитных газов металлоконструкций из низколегированных сталей осуществляется в углекислом газе и смесях на его основе сварочной проволокой Св-08Г2С (для сталей типа ГС), Св-08ХГ2С (для ХСНД) или порошковыми проволоками. Технология и режимы такие же, как при сварке низкоуглеродистых сталей. Для повышения коррозионной стойкости сварных швов применяют проволоку Св-08ХГ2С.

Электрошлаковая сварка этих сталей осуществляется проволоками Св-08ГС, Св-10Г2. При сварке толщин более 30 мм необходима последующая термообработка по циклу нормализации для обеспечения требуемых значений ударной вязкости. Для термоупрочненных сталей применяют проволоки Св-10НМ и сварку ведут с сопутствующим охлаждением.

5.1.9. СВАРКА МИКРОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Микролегированные стали (низколегированные) 09Г2ФБ, 14Г2ФБ, 12Г2СМФ, 09ХГ2НАБ, 08Г2ФБТ и другие применяют для изготовления сероводородостойких сооружений газовой и нефтяной промышленности. Основными легирующими элементами являются Mn (до 1,8%), Si (до 0,8%), Mo (до 0,2%), V (до 0,15%), Zr (до 0,15%), а также Cr, Ni или Ti. Количество углерода обычно не более 0,2%.

Свойства этих сталей зависят от термообработки в состоянии поставки, в результате которой получают ферритно-перлитную, ферритно-бейнитную или ферритно-мартенситную структуру. При содержании бейнитной и мартенситной фаз не более 20% и углерода менее 0,1% эти стали обладают достаточно хорошей свариваемостью.

Ручная дуговая сварка корневых швов в связи с опасностью возникновения холодных трещин выполняется электродами Э50 с целлюлозным покрытием, обеспечивающими более пластичный наплавленный металл. Однако заполнение разделки осуществляют электродами класса Э70 с фтористо-кальциевым покрытием. Для уменьшения вероятности образования трещин возможно использовать подогрев (при сварке корневого шва), температура которого зависит от толщины металла и $C_{экв}$. При толщине металла более 20 мм подогрев в пределах от 100 до 150°C практически обязателен для всех микролегированных сталей.

Сварка под флюсом в зависимости от состава стали выполняется проволоками Св-08ХМ, Св-08ГНМ и Св-10НМА, которые компенсируют микролегирование металла шва, под кремнемарганцовистыми флюсами. Для повышения стойкости сварного соединения против образования трещин сварку под флюсом микролегированных сталей рекомендуют выполнять с предварительным подогревом.

Электрошлаковая сварка обычно осуществляется проволокой типа Св-10НМ, Св-10Г2СМА с кремнемарганцовистым флюсом. Выбор марки проволоки и флюса должен обеспечивать металл шва, аналогичный составу основного металла. Для устранения изменений структуры шва и околосшовной зоны (грубая крупнозернистая структура) и восстановления механических свойств необходимо после сварки производить термообработку сварных соединений по циклу нормализации или отпуск с температуры 600...700°C.

5.1.10. СВАРКА ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ ПЕРЛИТНЫХ СТАЛЕЙ

Низколегированные теплоустойчивые стали перлитного класса (12МХ, 12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 20ХМФЛ и др.) используют в сварных конструкциях энергетического машиностроения, работающих при температурах до 600°C. Для повышения жаропрочности при температурах 450...585°C стали

этой группы легируют хромом, молибденом, вольфрамом и ванадием (С до 0,2%, Cr до 2%, Мо до 1%, V до 0,3%). Общее содержание легирующих компонентов достигает 4%.

Требуемые значения сопротивления ползучести и длительной прочности обеспечиваются химическим составом и термообработкой (нормализация или закалка с высоким отпускком).

Вероятность образования структур мартенсита или бейнита на участках околошовной зоны, нагретых выше A_{c3} , водородное охрупчивание и остаточные сварочные напряжения — основные причины образования холодных трещин, развития процессов старения, разупрочнения и охрупчивания металла при эксплуатации. Основными мерами борьбы с этими процессами являются ограничение содержания углерода в основном металле, сварка с предварительным подогревом, выбор оптимальных режимов сварки, термообработка после сварки. Температуру предварительного подогрева выбирают в зависимости от состава и толщины свариваемой стали в диапазонах 150...350°C для сталей типа ХМ толщиной более 10 мм, 200...400°C для сталей типа Х1МФ и 250...450°C для сталей Х1М1Ф толщиной более 6 мм.

Восстановление свойств сварных соединений до уровня свойств основного металла обеспечивается только термообработкой всего изделия по циклу нормализации, так как местная обработка приведет к разупрочнению прилегающих участков металла.

Верхнюю температуру подогрева также ограничивают, так как при высокой температуре и длительной выдержке вследствие роста зерна образуется грубая ферритно-перлитная структура и происходит снижение прочности и ударной вязкости. Выдержка сварных соединений после сварки при $T = 150...200^\circ\text{C}$ в течение нескольких часов способствует завершению распада аустенита и эвакуации водорода, что снижает вероятность образования холодных трещин.

При эксплуатации этих сталей в диапазоне температур от 450 до 600°C особенно опасна диффузия углерода, вызывающая формирование в зоне сплавления сварных соединений химической неоднородности, состоящей из участков, обедненных углеродом с одной стороны и обогащенных карбидами с другой. Это уменьшает длительную прочность и увеличивает склонность к разрушению в зоне сплавления. Поэтому химический состав металла шва должен быть близок к основному металлу.

Основными способами сварки являются дуговые методы, причем сварку необходимо проводить при положительной температуре окружающей среды.

Ручная дуговая сварка реализуется с использованием электродов с фтористо-кальциевым покрытием и стержнем из низкоуглеродистой проволоки. Легирование осуществляется через покрытие, при этом для сталей ХМ и ХМЛ применяют электроды Э-09Х1М, для сталей ХМФ — электроды типа Э-09Х1МФ. Сварку ведут на постоянном токе обратной полярности, с минимальным значением напряжения дуги, узкими валиками без колебаний. Многослойную сварку выполняют каскадом и горкой. Если невозможны подогрев и последующая термообработка, то применяют электроды на никелевой основе (Св-08Н60Г8М7), так как скорость диффузии углерода в аустените мала и образование карбидов не происходит.

Сварка в среде углекислого газа используется при однопроводной сварке или для заварки дефектов литья. Применение этого способа ограничивают при выполнении многослойных швов из-за возможного образования шлаковых включений между слоями. Процесс ведут на постоянном токе обратной полярности проволоками, соответствующими составу свариваемой стали, с обязательным содержанием кремния и марганца. Так, для сварки сталей типа ХМ применяют проволоку Св-08ХГСМА, а для сталей типа ХМФ — проволоку Св-08ХГСМФА.

Сварка в аргоне и газовых смесях применяется для ответственных конструкций. Сварку в аргоне вольфрамовым электродом с присадочной проволокой применяют для выполнения корневых швов. При сварке в среде аргона сталей типа ХМ плавящимся электродом применяют проволоку Св-08ХМ или Св-08ХГСМА, а для сталей типа ХМФ — проволоку Св-08ХМФА или Св-08ХГСМФА, причем проволоки Св-08ХМ и Св-08ХМФА должны содержать не менее 0,22% кремния.

Сварка под флюсом используется для изделий с толщиной стенки более 20 мм. Выбирают флюсы, низкоактивные по кремнию и марганцу, для предотвращения образования неметаллических включений при прохождении Si-Mn восстановительного процесса, содержащие фтористые соли для снижения количества растворенного водорода. Проволоки для сварки сталей типа ХМ — Св-08ХМ и Св-08МХ, а для сталей типа ХМФ — Св-08ХМФА. Сварку ведут на постоянном токе обратной полярности. Для уменьшения разупрочнения в зоне термического влияния рекомендуют режимы сварки с минимальной погонной энергией при малых диаметрах электрода и максимальной скорости сварки.

5.1.11. СВАРКА НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТИ

Для снижения веса конструкций применяют стали, сочетающие высокую прочность с достаточной пластичностью, вязкостью, усталостной прочностью и свариваемостью. Примерами таких сталей являются сталь 16Г2АФ с минимальным пределом текучести 450 МПа и сталь 14Х2ГМР с минимальным пределом текучести 600 МПа. Высокие механические свойства стали 16Г2АФ достигаются использованием в качестве легирующих элементов ванадия и азота (нитридное упрочнение), а в стали 14Х2ГМР — бора.

Наиболее опасный дефект сварных соединений этих сталей — холодные трещины, образование которых связано с мартенситным превращением и растворенным в металле водородом. Поэтому следует уменьшать скорость охлаждения металла шва и околошовной зоны и снижать количество растворенного в металле водорода.

Однако для ограничения роста зерна в металле шва и околошовной зоны и разупрочнения металла в зоне термического влияния необходимо увеличивать скорость охлаждения металла при сварке.

Оптимальные значения мгновенных скоростей охлаждения на границе сплавления при температуре 500...600°C $W_{\text{опт}}$ находятся в интервале 4,5...30°C/с для стали 16Г2АФ и в интервале 3,5...13,5°C/с для стали 14Х2ГМР.

Для обеспечения высокого качества соединений при сварке этих сталей необходимы подогрев свариваемых кромок, просушка и прокатка сварочных материалов, тщательная очистка поверхности основного металла и сварочной

проволоки от ржавчины и смазок. Кроме того, для ограничения роста зерна в околошовной зоне следует уменьшать погонную энергию сварки, увеличивать число проходов при сварке, использовать легированные сварочные проволоки, порошковые присадочные материалы и другие способы модификации металла шва.

Ручную дуговую сварку стали 16Г2АФ и 14Х2ГМР осуществляют электродами типа Э50А-Ф и Э60А-Ф, которые перед сваркой прокаливают при 430–480°C.

Многослойную сварку конструкций толщиной более 16 мм рекомендуют выполнять с использованием так называемой «мягкой прослойки» и предварительным и сопутствующим подогревом свариваемых кромок до 120...160°C. При этом первые слои наплавляют электродами Э45...Э50 А, а последующие — электродами Э60 А-Ф. При двусторонних швах стыковых соединений ручную дуговую сварку стали такой толщины должны вести одновременно несколько сварщиков.

Для сварки под флюсом следует применять сварочную проволоку типа Св-10НМА, Св-08Г2СА (для стали 16Г2АФ) или проволоку типа Св-10ХГ2Н2МЮ (для стали 14Х2ГМР) и флюсы с пониженным содержанием кремния. Для повышения сопротивления сварных соединений образованию холодных трещин многослойную сварку под флюсом деталей толщиной свыше 40 мм можно выполнять с «мягкой прослойкой», для чего первые слои наплавляют сварочной проволокой марки Св-08ГА. Предварительный подогрев перед сваркой металла толщиной свыше 20 мм обязателен.

Сварку в углекислом газе (или в смесях газов) стали 16Г2АФ проводят проволокой Св-08Г2С, а стали 14Х2ГМР — проволокой Св-10ХГСН2МЮ. Для некоторых соединений возможно применение порошковых проволок карбонатно-флюоритного типа. Сварка при толщине деталей до 16 мм осуществляется по обычной технологии (диаметр проволоки 2 мм, сварочный ток 430...450 А, напряжение дуги 30...34 В). При сварке деталей толщиной более 16 мм требуется предварительный, а при многослойной сварке сопутствующий подогрев свариваемых кромок до 120...160°C. Жесткие конструкции больших толщин рекомендуют выдерживать после сварки при температуре 200°C в течение 1 ч.

Электрошлаковую сварку осуществляют проволокой типа Св-10НМА или Св-10ХГСН2МЮ под низкремнистым флюсом и другими сварочными материалами, обеспечивающими необходимые свойства сварных соединений. Режимы устанавливают конкретно для каждой конструкции.

5.2. СВАРКА УГЛЕРОДИСТЫХ И СРЕДНЕЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

5.2.1. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СТАЛЕЙ

Основные легирующие элементы в этих сталях — хром, марганец, кремний, никель, титан и др. с суммарным содержанием элементов до 10%.

По структуре стали относятся к перлитному классу. Однако некоторые из них, содержащие легирующих элементов 5...6% и более, могут быть мартенситного или переходного классов. Высокие механические свойства

среднелегированных сталей достигаются при соответствующей термической обработке. Наиболее распространенной термообработкой является улучшение (закалка с последующим высоким отпуском) или закалка и низкий отпуск.

К группе закаливающихся сталей относят и нелегированные средне- и высокоуглеродистые стали с содержанием углерода 0,3...0,6% — стали 30, 35, 40, 45, 50, 60, 25Г, 35Г, 45Г. Высокоуглеродистые стали в сварных конструкциях, как правило, не используют. Необходимость их сварки возникает при наплавке и ремонте.

Для ответственных конструкций используют легированные стали перлитного класса средней прочности с $\sigma_{\text{в}} = 900 \dots 1300$ МПа. Это стали 25ХГСА, 30ХГСА и другие с меньшим или большим содержанием углерода и сложнолегированные стали с низким содержанием углерода, например 12Х2НВФА, 23Х2НВФА. Они отличаются лучшей свариваемостью по сравнению с высокопрочными легированными сталями типа 30ХГСН2А, 28ХЗСНВФА, 30Х2ГСНВМ и другими с $\sigma_{\text{в}} = 1500 \dots 2000$ МПа.

Высокопрочные стали последней группы в зависимости от степени легирования и содержания углерода относятся к удовлетворительно, ограниченно или плохо свариваемым сталям. Помимо образования закалочных структур и холодных трещин, сварные соединения этих сталей характеризуются повышенной чувствительностью к концентраторам напряжений при статических и особенно при динамических нагрузках. При этом опасность разрушения тем больше, чем выше содержание легирующих элементов, особенно углерода.

При разработке технологии главное внимание должно быть уделено правильному выбору свариваемых материалов — основного и присадочного металла.

Основной металл с пониженным содержанием углерода и примесей (серы, фосфора) обладает большей стойкостью против холодных и горячих трещин при сварке.

Для повышения пластичности сварного шва и увеличения сопротивления хрупким разрушениям содержание углерода в присадочном металле должно быть не более 0,15%. Целесообразно предусмотреть широкую разделку кромок, чтобы обеспечить формирование шва в основном за счет более пластичного присадочного металла.

Высокое сопротивление образованию горячих трещин металла сварного шва достигается при ограничении содержания легирующих элементов в присадочной проволоке до следующих пределов, %: 0,15 C; 0,5 Si; 1,5 Mn; 1,5 Cr; 2,5 Ni; 0,5 V; 1,0 Mg; 0,5 Nb.

В качестве защитных средств необходимо использовать покрытия и флюсы основного типа, а также инертные газы (для легированных сталей).

Для уменьшения сварочных напряжений, являющихся одной из причин образования трещин, необходимо при конструировании избегать жестких узлов, пересекающихся и близко расположенных швов.

Для получения качественного сварного соединения необходимы:

- тщательная подготовка и сборка под сварку с минимальным смещением кромок (менее 15% толщины), качественные прихватки и зачистка кромок;

- регулирование термического цикла сварки для обеспечения требуемой скорости охлаждения шва и зоны термического влияния;
- ограничение содержания водорода в сварном соединении;
- рациональная последовательность выполнения швов с целью уменьшения остаточных напряжений и деформаций.

Сразу после сварки для предотвращения образования холодных трещин производят высокий отпуск для снятия остаточных напряжений и стабилизации структуры. Равнопрочность сварного соединения обеспечивают при полной термообработке изделия после сварки по циклу заковки с последующим высоким отпуском или нормализации.

Если габариты изделия и имеющееся оборудование допускают полную термообработку, то химический состав металла шва должен быть близок химическому составу основного металла. Если полная термообработка невозможна, то равнопрочность для сталей, имеющих предел прочности 700...750 МПа, обеспечивают подбором режимов сварки и дополнительным легированием через присадочную проволоку.

5.2.2. СВАРКА НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ БЕЙНИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ

Состав и свойства. Низкоуглеродистые бейнитно-мартенситные стали применяют для ответственных конструкций различного назначения, в том числе — работающих при низких температурах до -70°C .

Содержание углерода в этих сталях обычно не превышает 0,15%. Основными легирующими элементами являются Mn до 2%, Si до 0,5%, Cr до 1,5% и Ni до 2%, кроме того, в сталях содержатся Mo, V, Al, B. Основные марки низкоуглеродистых бейнитно-мартенситных сталей: 13ХГМРБ, 12ХГН2МФБДАЮ, 14Х2ГН2МДАФБ и др.

Оптимальные механические свойства и сопротивление хрупкому разрушению при низких температурах ($\sigma_{0,2} = 700...800$ МПа, $KCU = 40$ Дж/см² при -40°C) обеспечиваются за счет термообработки по циклу заковка или нормализация с последующим высоким отпуском.

Основными фазовыми превращениями при скоростях охлаждения соответствующих способам сварки плавлением являются превращения аустенит \rightarrow мартенсит и аустенит \rightarrow бейнит. Структуру определяет скорость охлаждения в диапазоне температур 500...600 $^{\circ}\text{C}$ ($W_{6/5}$). В сталях, легированных никелем, повышается устойчивость аустенита и допустимые скорости охлаждения будут меньше, чем в безникелевых сталях. Так, например, в стали 12ГН2МФАЮ при скорости охлаждения $W_{6/5}$ больше 10 $^{\circ}\text{C}/\text{с}$ образуется мартенсит, и только при скорости менее 2 $^{\circ}\text{C}/\text{с}$ проходит превращение аустенит \rightarrow бейнит (рис. 5.9).

Технология сварки. Так как содержание серы и фосфора в этих сталях ограничено, а количество кремния и углерода не велико, то практически отсутствует склонность к образованию горячих трещин. Наиболее опасным дефектом являются холодные трещины в шве и околошовной зоне, появление которых обусловлено присутствием растворенного в металле водорода и возникающими в соединении сварочными напряжениями и деформациями.

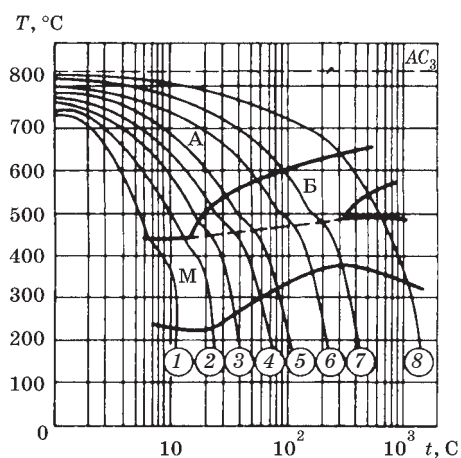


Рис. 5.9
Термокинетическая диаграмма распада аустенита стали 12ГН2МФАЮ:

1–8 — кривые скорости охлаждения, которым соответствуют значения твердости стали 400, 390, 380, 355, 311, 300, 290 и 275HV; AC_3 — верхняя критическая температура превращения аустенит–перлит на диаграмме состояния системы Fe–C; А — аустенит, Б — бейнит, М — мартенсит.

Основными направлениями повышения сопротивляемости образованию холодных трещин являются:

1. Металлургическое воздействие на металл шва.
2. Изменение термического цикла и предельных скоростей охлаждения в ОШЗ.
3. Снижение остаточных и временных сварочных напряжений и деформаций.

В зависимости от зоны сварного соединения сопротивляемость образованию холодных трещин обеспечивается различными методами.

В наплавленном металле шва снижают содержание водорода до 4 мл на 100 г металла за счет металлургических процессов и выбора сварочных материалов, а также выбора способа сварки, рода тока и полярности. Кроме того, используют технологию сварки с мягкими прослойками, когда сварку корневого шва выполняют пластичным металлом. При большой толщине свариваемого металла электродами из пластичного металла выполняют первый слой и промежуточные 1...2 слоя. Для этого используют присадочные материалы типа Св-10ГА, Св-08Г2С или электроды типа Э45 с фтористо-кальциевым покрытием.

В околошовной зоне ограничивают допустимую скорость охлаждения в зависимости от состава стали. Так, например, для сталей 14Х2ГМР, 14ХГ2САФД скорость $W_{6/5}$ должна быть в диапазоне 13...18°C/с, а для сталей 14ХГН2МДАФБ и 12ХГН2МФБДАЮ — в диапазоне 2...7°C/с, так как никель стабилизирует аустенит. Кроме того, необходим предварительный подогрев для снижения склонности к образованию холодных трещин при сварке больших толщин и жестких соединений. При сварке листов толщиной до 20 мм температура подогрева должна быть до 100°C, а для толщин до 40 мм — до 150°C. Если сварку выполняют при отрицательных температурах, то температуру подогрева необходимо увеличить на 20...30°C.

Равнопрочность или требуемые прочностные и пластические свойства сварного соединения в целом обеспечивают термическим циклом при сварке. Основным критерием является охлаждение W_o . При этом необходимо определять минимальную ($W_{o\min}$) и максимальную ($W_{o\max}$) скорости охлаждения. Скорость

$W_{o\min}$ в основном выбирают из условия ограничения образования крупнозернистой структуры, которая обладает пониженной ударной вязкостью. Скорость $W_{o\max}$ определяется склонностью к образованию холодных трещин. При этом необходимо учитывать время пребывания некоторых участков околошовной зоны при температурах выше температуры отпуска, когда начинается интенсивный рост зерна.

Максимальные значения q/V выбирают по показателям ударной вязкости металла по линии сплавления, так как на этом участке наибольшая температура нагрева, максимальная скорость охлаждения и, следовательно, максимальная потеря пластичности.

При сварке бейнитно-мартенситных сталей скорость охлаждения целесообразно регулировать не только за счет q/V , но и за счет температуры предварительного и последующего подогрева. Увеличение q/V может привести к увеличению времени пребывания металла околошовной зоны при высоких температурах, что вызовет снижение уровня механических свойств. В то же время подогрев при температурах ниже 300°C способствует снижению содержания водорода и повышает стойкость к холодным трещинам. Поэтому рекомендуют при толщинах до 20 мм в основном регулировать скорость охлаждения за счет q/V , а при больших толщинах — за счет q/V и предварительного и последующего подогрева в интервале 50...150°C.

Ручная дуговая сварка выполняется электродами типа Э-70 с фтористо-кальциевым покрытием, обеспечивающими при сварке постоянным током обратной полярности получение наплавленного металла с низким содержанием водорода и углерода (не более 0,1%) и легирующими элементами Mn, Si, Cr, Mo, Ni. Диаметр электрода для сварки корневого шва не более 4 мм. Технология сварки для толщин до 20 мм предусматривает последовательное наложение швов, при больших толщинах — каскад и горка. Основным критерием выбора длины участка является температура подогрева во время сварки. При рациональном выборе техники сварки (каскадом или горкой) предварительный подогрев нужен только для корневого шва.

Сварка в защитных газах выполняется в CO_2 и смесях газов на основе аргона — 80% Ar + 20% CO_2 . При малых толщинах соединяемых деталей и сварке в различных пространственных положениях применяют проволоки диаметром 1,0...1,2 мм, в остальных случаях — 1,6 мм. В составе проволоки (Св-08Г2С, Св-10ХГ2МА, Св-08ХН2Г2СМЮ) для сварки в CO_2 в качестве ракислителей содержится кремний и марганец. При сварке в газовых смесях с большим содержанием аргона состав проволоки близок к составу стали, но имеется ограничение по углероду — Св-08ХН2ГМЮ. Легированные проволоки применяют только при сварке больших толщин и угловых швов с большими катетами.

Сварка под флюсом ведется в основном на постоянном токе обратной полярности. Для снижения вероятности образования холодных трещин применяют низкремнистые флюсы окислительного типа и для многопроходных и угловых швов кремний-марганцовистые флюсы, которые обеспечивают пониженное содержание водорода, а также серы и фосфора. Состав проволок определяется составом основного металла, но с пониженным содержанием углерода — Св-08ХН2М, Св-08ХН2ГМЮ, Св-08ХН2Г2СМЮ. При сварке корневых швов

стыковых соединений большой толщины с разделкой кромок для борьбы с холодными трещинами применяют низколегированные проволоки типа Св-08ГА, Св-10Г2, а заполнение разделки производят проволокой типа Св-08ХН2ГМЮ. Для сварки стыковых соединений без разделки кромок используют менее легированную проволоку типа Св-08ХН2М, так как в шве большая доля участия основного металла, что обеспечивает требуемую прочность. При толщине деталей до 10 мм применяют односторонние швы, при толщинах более 20 мм выполняют многопроходную сварку с разделкой кромок.

Электрошлаковая сварка выполняется с использованием кремний-марганцовистых окислительных флюсов и проволоки, соответствующей составу основного металла типа Св-10НМА, Св-10ХГ2СНА. Основной задачей при сварке является обеспечение скорости охлаждения не ниже $W_{6/5} = 4^\circ\text{C}/\text{с}$ для получения требуемой структуры и прочности, поэтому при сварке следует проводить сопутствующее дополнительное охлаждение шва и околошовной зоны.

5.2.3. СВАРКА СРЕДНЕЛЕГИРОВАННЫХ МАРТЕНСИТНО-БЕЙНИТНЫХ СТАЛЕЙ

Состав и свойства. В составе этих сталей увеличено количество С до 0,4%. Они содержат также Ni (до 3%), Cr (до 2%), Mn (до 1%), Si (до 1,2%), другие легирующие элементы и минимальное количество серы и фосфора. Наиболее часто в сварных конструкциях используют мартенситно-бейнитные стали марок 30ХГСН, 30ХГСА, 42Х2ГСНМА и 40ХГСНЗМА. Требуемое сочетание прочностных и пластических свойств ($\sigma_s =$ до 2000 МПа, КСЧУ = 50...70 Дж/см² при 20°C) в среднелегированных сталях получают в результате термомеханической обработки.

Основными превращениями в шве и околошовной зоне остаются аустенитно-бейнитное и аустенитно-мартенситное. В связи с высокой прочностью основного металла главное внимание уделяют участку околошовной зоны, претерпевающему аустенитное превращение, т. е. нагретому выше температуры A_{c1} . На этом участке выделяют три температурные области:

- 1) область перегрева, где образуется крупное зерно и формируется высокотемпературная химическая неоднородность;
- 2) область аустенизации с оптимальной величиной зерна и высокими прочностными и пластическими свойствами;
- 3) область неполной аустенизации и высокого отпуска.

Основную опасность представляют область перегрева и область высокого отпуска.

В области перегрева образуется высокотемпературная микрохимическая неоднородность в результате оплавления границ зерен и микрообъемов металла околошовной зоны у линии сплавления, содержащих легкоплавкие сульфиды. Эта неоднородность оказывает влияние на образование хрупких структур. Их количество возрастает, что обуславливает повышенную склонность к образованию холодных трещин. Влияние этого процесса увеличивается с ростом содержания углерода в стали.

Так как участок высокотемпературной химической неоднородности имеет пониженную ударную вязкость, то он определяет склонность сварного

соединения к замедленному разрушению по оплавленным границам зерен, которые впоследствии могут развиваться в горячие или холодные трещины.

В области высокого отпуска (500...700°C) происходит разупрочнение основного металла, которое возрастает с ростом погонной энергии, увеличивающей ширину этой зоны. Для каждой толщины основного металла и способа сварки существует определенная ширина зоны отпуска, при которой сварное соединение еще сохраняет равнопрочность основному металлу.

Технология сварки. Свариваемость этих сталей и качество сварного соединения в целом определяется склонностью околошовной зоны к образованию холодных трещин. Поэтому наиболее важным становится выбор теплового режима сварки, который должен уменьшать ширину зоны отпуска, исключать развитие микрохимической неоднородности и препятствовать образованию холодных и горячих трещин.

Уменьшение зоны микрохимической неоднородности вблизи линии сплавления и снижение склонности к зарождению хрупких разрушений в этой зоне обеспечиваются следующими методами:

- применение концентрированных источников с малыми значениями q/V ;
- применение при сварке аустенитных или легированных ферритных сталей присадочных материалов с меньшими, чем у основного металла, температурами плавления и с большей пластичностью;
- применение «горячей» или «холодной» присадки;
- предварительная наплавка кромок для уменьшения перегрева основного металла у линии сплавления и торможения формирования микрохимической неоднородности.

Меньшая температура плавления присадочных материалов снижает нагрев сварочной ванны у линии сплавления, препятствует оплавлению границ зерен и развитию химической неоднородности. При этом повышенная пластичность наплавленного металла снижает вероятность развития хрупких разрушений.

К методам, снижающим вероятность развития хрупких разрушений, относятся предварительный и сопутствующий подогрев и термообработка после сварки.

Ручная дуговая сварка осуществляется электродами с покрытием основного типа. Выбор сварочных материалов, режимов и технологии сварки определяется механическими свойствами сталей и условиями эксплуатации сварных конструкций. Для сталей с $\sigma_b > 1000$ МПа и толщиной более 2 мм используют электроды Э-85 (стержень из Св-08А) или Э-100 (стержень типа ХНМА). При сварке этими электродами необходима последующая термообработка на требуемую прочность по циклу: закалка и отпуск. Для стали с σ_b около 600 МПа применяют электроды аустенитного класса типа Э-10Х20Н9Г6С или Э-11Х15Н25М6АГ2. В этом случае последующую термообработку не проводят.

Сварка в защитных газах выполняется в аргоне или в газовых смесях на основе аргона неплавящимся и плавящимся электродом.

Неплавящийся электрод чаще всего применяют для сварки малых толщин (3–5 мм). Первый слой сваривают без присадочной проволоки с полным проплавлением и формированием обратного валика. Второй и последующие слои сваривают с присадочной проволокой, соответствующей составу стали (типа Св-18ХМА, Св-20Х2ГСНВМ), что требует термообработки после сварки по циклу

закалка–отпуск, либо проволоки аустенитного класса (типа Св-08Х20Н9Г7Т, Св-08Х16Н25АМ6) без проведения последующей термообработки. Для увеличения проплавления при механизированной сварке неплавящимся электродом используют активирующие флюсы на основе SiO_2 , NaF , TiO_2 , Cr_2O_3 .

Сварку в аргоне и газовых смесях плавящимся электродом используют для сталей повышенной прочности и обеспечения в сварных соединениях 0,9...0,95 от прочности основного металла. Для этого применяют проволоки типа Св-20Х2ГСНВМ и Св-20ХСНВФАВД с последующей термообработкой по циклу закалка–отпуск. Кроме того, возможно применение проволок аустенитного класса Св-08Х20Н9Г7Т или Св-10Х16Н25АМ6 без последующей термообработки, но при этом получают меньшие значения прочностных свойств сварного соединения.

Сварка плавящимся электродом в CO_2 используется для сталей с σ_b около 600 МПа. При этом применяют проволоки Св-18ХГС, Св-08ГСМТ, Св-18ХМА с последующей термообработкой по циклу закалка и отпуск. Применение проволоки аустенитного класса Св-08Х20Н9Г7Т позволяет избежать последующей термообработки.

Сварка под флюсом применяется для толщин более 4 мм. Первый (корневой) шов рекомендуют выполнять аргоно-дуговой сваркой, а заполнение разделки осуществляют сваркой под флюсом. Флюсы при сварке низкоуглеродистой или низколегированной проволокой применяют низкокремнистые и низкомарганцовистые. Сварку аустенитными проволоками ведут со слабо окислительными или бескислородными (фтористыми) флюсами. Обязательна прокатка флюса перед сваркой при температуре 350...500°C с выдержкой 2...3 ч для снижения содержания водорода в металле шва.

При использовании низкоуглеродистой или низколегированной (ферритной) проволоки Св-18ХГС, Св-18ХМА необходимо сразу после сварки проводить местный или общий отпуск при 600...650°C для предупреждения образования холодных трещин. При сварке ферритной проволокой больших толщин и жестких конструкций рекомендуют выполнять предварительный подогрев до 150...300°C. Применение аустенитных проволок Св-08Х20Н9Г7Т или Св-10Х16Н25АМ6 позволяет исключить последующую термообработку.

Сварку под флюсом ведут на постоянном токе обратной полярности в основном однопроводными швами для уменьшения зоны термического влияния и содержания водорода в металле шва. Для повышения производительности сварки и снижения доли участия основного металла в шве применяют дополнительную подачу подогретой присадочной проволоки.

Электрошлаковая сварка применяется только в том случае, если возможна последующая термообработка, так как за счет большой доли участия основного металла в шве содержится большое количество углерода и легирующих элементов. В этом случае проволоки выбирают на основании требований к составу шва — Св-18ХГС или Св-18ХМА. Флюсы практически не влияют на состав металла шва, поэтому используют кремнемарганцовистые флюсы или, при необходимости дополнительного легирования, флюсы на основе фторидов.

Для предупреждения образования холодных трещин в околошовной зоне при сварке металла толщиной более 100 мм применяют подогрев до 200°C.

Кроме того, используют предварительную наплавку на кромку слоя металла, стойкого к перегреву. Для предупреждения образования холодных трещин в шве используют приемы, увеличивающие количество наплавленного металла — сварку на повышенном вылете, сварку проволокой меньшего диаметра и другие. Для уменьшения размеров зоны высокотемпературной химической неоднородности и склонности к хрупким разрушениям используют прерывистую подачу энергии и охлаждение водой сварного соединения в процессе сварки.

5.3. СВАРКА ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

5.3.1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛЕЙ И ОБЩИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ СВАРКИ

Состав и свойства. Высоколегированными сталями считают сплавы на основе железа с суммарным содержанием легирующих элементов свыше 10% при содержании железа в них более 45%. Если содержание железа меньше этой величины, то материалы считаются специальными сплавами. Основными легирующими элементами сталей и сплавов этой группы являются Cr, Ni, Mn, Si, Co, W, V, Mo, Ti и B.

Высоколегированные стали и сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью, хладостойкостью, жаропрочностью, жаростойкостью и сопротивлением ползучести при нагреве.

Жаростойкость (окалиностойкость) — свойство металлов и сплавов противостоять при высоких температурах химическому воздействию, в частности, окислению на воздухе или в другой газовой среде.

Жаропрочность — способность материалов при высоких температурах выдерживать без разрушения механические нагрузки.

В зависимости от *содержания основных легирующих элементов* стали разделяют на хромистые, хромоникелевые, хромомарганцевые, хромомарганцевоазотистые и т. д.

По *структуре* высоколегированные стали разделяют на мартенситные, мартенситно-ферритные, ферритные, аустенитно-мартенситные, аустенитно-ферритные и аустенитные.

Хромистые стали имеют структуру, зависящую от содержания хрома и углерода, и могут относиться к мартенситному, мартенситно-ферритному или ферритному классу. Введение в сталь других элементов также изменяет ее структуру и может перевести сталь из одного класса в другой.

Хромоникелевые, хромомарганцевые, хромоникельмолибденовые и хромоникельмарганцевые стали имеют аустенитно-мартенситную, аустенитно-ферритную или аустенитную структуру.

Сплавы на железоникелевой (никеля более 30%) и никелевой (никеля более 55%) основах по структуре являются стабильно аустенитными и не имеют полиморфных превращений при нагреве и охлаждении. Известны также двухфазные стали и сплавы, основная структура которых — аустенит с включениями карбидных и боридных фаз.

В ферритных и аустенитно-ферритных сталях, содержащих 15...20% слож-нолегированного феррита, при работе изделий в интервале температур от 350 до 500°C может проявиться 475-градусная хрупкость.

В аустенитных и аустенитно-ферритных сталях при температурах 550...875°C возникает охрупчивание в результате выпадения интерметаллидной σ -фазы (FeCr).

Склонность к охрупчиванию аустенитных сталей снижают закалкой с температур 1050...1100°C, а в двухфазных аустенитно-ферритных сталях — ограничением содержания первичного феррита (менее 20%).

Под действием температур (500...800°C) по границам зерен выделяются карбиды, обогащенные хромом и интерметаллиды (старение). Одновременно происходит обеднение хромом приграничных слоев зерен, которое ведет к потере стойкости к межкристаллитной коррозии. Межкристаллитная коррозия и другие виды коррозионного разрушения, связанные с перераспределением хрома, наблюдаются в металле шва, околошовной зоны или в узкой зоне на границе сплавления (ножевая коррозия).

Склонность сплавов к межкристаллитной коррозии уменьшают:

- снижением содержания углерода и легированием сильными карбидо-образующими элементами — титаном и ниобием, имеющими большее сродство к углероду, чем хром, в соотношении $\% \text{Ti} > 5$ ($\% \text{C} - 0,02$) и $\% \text{Nb} > 10$ ($\% \text{C}$);
- формированием двухфазной аустенитно-ферритной структуры с содержанием феррита до 20...25%;
- термической обработкой (закалка аустенитных сталей с температуры 1050...1100°C или стабилизирующий отжиг в течение 2...3 ч при температурах 850...900°C для хромоникелевых сталей и при 700...780°C для хромистых сталей).

При нагреве под закалку карбиды растворяются и при быстром охлаждении углерод фиксируется в твердом растворе (аустените). Однако повторный нагрев может усилить склонность к межкристаллитной коррозии. Выравнивание концентрации хрома по объему зерна может быть достигнуто при стабилизирующем отжиге.

Высокая коррозионная стойкость сталей при повышенных температурах в газовой среде (жаростойкость) определяется также возможностью образования и сохранения на их поверхности плотных и прочных пленок окислов. Это достигается при легировании сталей кремнием и алюминием.

Общие технологические приемы при сварке. Теплофизические и химические свойства высоколегированных сталей и сплавов определяют основные особенности их сварки.

Высокое удельное электросопротивление сталей требует применения уменьшенных вылетов проволоки при механизированных способах сварки, укороченных электродов и меньшей плотности сварочного тока — при ручной дуговой сварке. Низкая теплопроводность приводит к увеличению глубины проплавления, что следует учитывать при выборе режимов сварки. Повышенное тепловое расширение вызывает коробление изделий, для снижения которого следует обеспечивать максимальную концентрацию тепловой энергии.

Легирование сталей активными элементами обуславливает необходимость применения дополнительных металлургических мер и повышения качества защиты зоны плавления от атмосферных газов. Уменьшение угара легирующих элементов (титана и ниобия как карбидообразующих в коррозионно-стойких швах, хрома, кремния, молибдена и других как ферритизаторов) обеспечивают при ручной сварке короткой дугой без поперечных колебаний и при сварке в защитных газах, предупреждающих окисление в зоне сварки.

Насыщение металла шва водородом при сварке высокохромистых мартенситных и мартенситно-ферритных сталей может привести к образованию холодных трещин или к появлению в швах пор. Рекомендуется удалять влагу из газов, флюсов и покрытий электродов. Электроды и флюсы прокаливают при 450°C в течение 2 ч не ранее чем за 2–3 ч до сварки. Выполнение сварки на постоянном токе обратной полярности и использование фторидных флюсов и электродов с фтористокальциевым покрытием также способствует уменьшению пористости.

Вероятность образования в шве горячих трещин при сварке стабильно аустенитных сталей снижает применение сварочных проволок из стали вакуумного или электрошлакового переплава, содержащих минимальное количество вредных примесей. Режимы и приемы сварки должны обеспечивать уменьшение доли участия основного металла в металле шва и повышенный коэффициент формы шва.

Очагами коррозии могут быть остающиеся подкладки и непровары в шве, остатки шлака на поверхности и повреждение основного металла в результате попадания брызг, возбуждения дуги, плохо заваренных кратеров, что недопустимо при изготовлении кислотостойкой аппаратуры. Зона нагрева, образующаяся при использовании кислородно-дуговой и плазменной резки для подготовки кромок и при применении шлифовальных кругов, также имеет пониженную коррозионную стойкость. Воздушно-дуговая резка недопустима для подготовки кромок и удаления дефектов шва в связи с науглероживанием кромок. Для предупреждения появления различных видов коррозии в сварных соединениях при сварке коррозионно-стойких сталей следует уменьшать перегрев, при многослойной сварке перед последующим проходом охлаждать сварное соединение до температуры окружающей среды.

Основные способы сварки. Высоколегированные стали и сплавы сваривают следующими способами сварки плавлением: ручной дуговой покрытыми электродами, дуговой под флюсом, в защитных газах плавящимся и неплавящимся электродом, электрошлаковой сваркой. Применяют также сварку лучом лазера и электронно-лучевую сварку.

Ручная дуговая сварка осуществляется на постоянном токе обратной полярности. Кромки подготавливают и собирают под сварку так же, как и при сварке углеродистых сталей. Выбор марки электрода зависит от марки свариваемой стали и конкретных условий эксплуатации конструкции.

При сварке высоколегированных сталей и сплавов основное легирование наплавленного металла обеспечивается за счет металла электродного стержня. Дополнительное легирование осуществляется компонентами, введенными в состав покрытия электрода.

Сварка под флюсом является ведущим способом при изготовлении изделий из металлов толщиной 5...50 мм. Постоянная глубина проплавления по всей длине шва, и, следовательно, постоянный состав металла шва, отсутствие кратеров, вызванных сменой электродов, и чешуйчатости на поверхности швов, благоприятная форма швов являются преимуществом сварки под флюсом по сравнению с ручной дуговой сваркой покрытыми электродами. Однако трудно осуществить предварительный или сопутствующий подогрев.

Из-за более низкой температуры плавления и низкой теплопроводности высоколегированных сталей и сплавов для получения той же глубины проплавления, что и при сварке низколегированных сталей, сварочный ток должен быть уменьшен на 10...30%. Из-за повышенного сопротивления вылет электрода уменьшают в 1,5...2 раза по сравнению со сваркой низкоуглеродистой стали. Поскольку для предупреждения образования горячих трещин швы должны быть небольшого сечения, рекомендуется использовать электродную проволоку диаметром 2...3 мм. При использовании фторидных флюсов сварку ведут на постоянном токе обратной полярности, при использовании высокоосновных безфтористых флюсов — на постоянном токе прямой полярности.

Сварка вольфрамовым электродом в инертных газах или их смесях отличается минимальным угаром легирующих элементов, что важно для высоколегированных сталей. Сварку выполняют на постоянном токе прямой полярности (за исключением сталей с большим содержанием алюминия, которые сваривают на переменном токе). Толщина свариваемого металла не более 5...7 мм. Хорошее формирование обратного валика позволяет рекомендовать сварку вольфрамовым электродом для выполнения корневых швов на сталях повышенных толщин (остальные валики можно выполнять покрытыми электродами, под флюсом или плавящимся электродом в защитных газах). Сварку можно вести непрерывно горячей или импульсной дугой.

Сварка плавящимся электродом в инертных газах или смесях газов выполняется при сварке сталей, содержащих легкоокисляющиеся элементы (алюминий, титан и др.). В качестве защитного газа используют аргон и выбирают силу тока, обеспечивающую струйный перенос электродного металла, особенно при сварке в вертикальном и потолочном положениях.

При использовании смесей аргона с кислородом и углекислым газом наблюдается повышенный угар легкоокисляющихся легирующих элементов (например, содержание титана уменьшается вдвое) и возможно науглероживание металла шва. Науглероживание коррозионно-стойких сталей можно нейтрализовать увеличением содержания в металле шва титана, ниобия и ферритизаторов (кремния, алюминия, хрома).

Электрошлаковая сварка в силу специфических особенностей этого способа сварки обеспечивает снижение вероятности образования в шве горячих трещин и уменьшение угловых короблений изделия. Однако увеличенная ширина околошовной зоны и длительное пребывание свариваемого металла при повышенных температурах приводят к снижению прочностных и пластических свойств металла, а в теплоустойчивых сталях могут возникать локальные разрушения. В околошовной зоне коррозионностойких сталей вероятно появление ножевой коррозии, для предотвращения которой следует выполнять

термическую обработку изделий (закалку или стабилизирующий отжиг). Применение флюсов не исключает угара легирующих элементов, поэтому в ряде случаев необходимо поверхность шлаковой ванны защищать инертным газом. Короткие швы на металле большой толщины рекомендуют сваривать пластинчатым электродом, а протяженные швы — проволочным.

5.3.2. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ВЫСОКОХРОМИСТЫХ СТАЛЕЙ

Хром от точки плавления до низких температур имеет решетку объемно-центрированного куба, изоморфную α -железу. В связи с этим легирование железа хромом приводит к расширению области δ -Fe (ОЦК решетка) и сужает область существования аустенита γ -Fe (рис. 5.10).

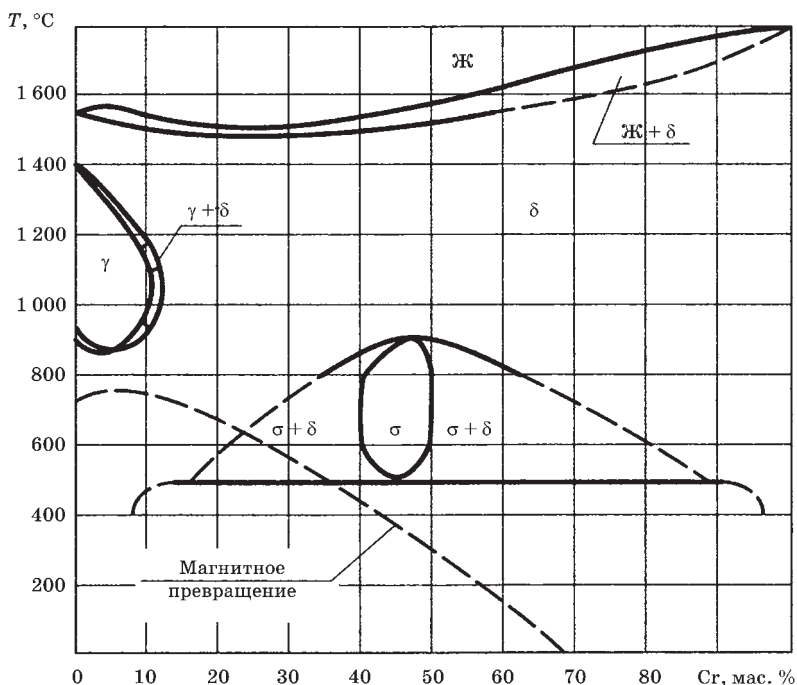


Рис. 5.10

Диаграмма состояния системы Fe—Cr:

Ж — жидкость; γ , δ , σ — полиморфные модификации.

Углерод, никель, азот и другие аустенизаторы расширяют область γ и способствуют практически полному γ — α (М) превращению в процессе охлаждения. Применение для закаленной стали отжига при температурах ниже точки A_3 способствует отпуску структур закалки и возможности получения одновременно высоких значений прочности, пластичности и ударной вязкости. Ферритизаторы — Mo, W, V, Nb — вводят для повышения жаропрочности сталей. Если обычные 12%-ные хромистые стали имеют достаточно высокие механические свойства при температурах до 500°C, то сложнолегированные

хромистые стали обладают высокими характеристиками до 650°C и используются для изготовления рабочих и направляющих лопаток, дисков паровых турбин и газотурбинных установок различного назначения.

Температурная область существования γ -растворов в хромистых сталях изменяется в зависимости от содержания в них хрома и углерода и в меньшей степени от содержания других элементов — никеля, молибдена.

Таким образом, стали с содержанием 0,05...0,06% C и 12...13% Cr относятся к мартенситному классу; при 13...16% Cr к мартенситно-ферритному, а при $Cr > 16\%$ к ферритному. С увеличением концентрации углерода граничные значения области превращения смещаются соответственно в сторону больших концентраций хрома.

Хром по отношению к кислороду обладает несколько большим сродством, чем железо, и образует окисел Cr_2O_3 с высокой температурой плавления. Хром также имеет большее сродством к углероду и является карбидообразующим элементом. Он может входить в состав карбидов типа цементит $(Fe, Cr)_3C$, а также образует карбиды типов Cr_7C_3 и $Cr_{23}C_6$. Карбиды хрома, термически более стойкие по сравнению с карбидом железа, растворяются медленнее и при более высоких температурах ($> 900^\circ C$).

Хром придает сплавам с железом ряд специфических свойств. Так, при содержании в стали 12% Cr возникающая при окислении поверхностная пленка приводит к пассивации поверхности, и сталь становится коррозионностойкой при относительно невысокой температуре. Для обеспечения окалиностойкости при более высоких температурах (800...1050°C) содержание хрома в сталях должно быть увеличено до 30%.

Общие требования к процессу сварки. Сварные соединения высокохромистых сталей, близкие по свойствам к основному металлу, могут быть получены только в тех случаях, когда химический состав металла швов подобен составу свариваемого металла, а после сварки возможна термообработка в виде высокого отпуска. Однако это не всегда выполнимо, особенно в условиях монтажа или ремонта.

В швах, по составу аналогичных основному металлу, и в зоне термического влияния сварных соединений, выполненных без предварительного и сопутствующего подогрева и последующей термообработки, возможно появление трещины из-за низкой деформационной способности металла. В таких случаях приходится отказываться от получения швов, подобных по составу свариваемой хромистой стали.

Более работоспособные сварные соединения получают при аустенитной или аустенитно-ферритной структуре металла швов, обычно хромоникелевых с достаточным количеством аустенизаторов, в основном никеля и марганца. Однако последующая термообработка таких сварных соединений по режиму, благоприятному для основного металла, как правило, ухудшает свойства металла шва и вызывает перепады остаточных напряжений вблизи границы сплавления. Поэтому термообработку таких соединений обычно не проводят.

Некоторые требуемые свойства сварных соединений могут быть получены, если шов по составу несколько отличается от свариваемой стали, например, имеет меньшую концентрацию углерода или содержит определенное количество титана.

Ручная дуговая сварка легче обеспечивает регулирование состава металла шва. Она наиболее распространена при изготовлении и ремонте изделий из высокохромистых сталей. В связи с тем, что растворяющийся при сварке в расплавленном металле водород усиливает склонность хрупкого металла шва и околошовной зоны к образованию холодных трещин, для сварки высокохромистых сталей не следует применять электродные покрытия, содержащие органические соединения. В этом случае используют электродные покрытия фтористокальциевого типа, у которых газовая защита обеспечивается за счет распада карбонатов, в основном мрамора. Высококальциевые шлаки способствуют удалению из сварочной ванны серы и фосфора, содержание которых в высокохромистых сталях ограничивают в большей степени, чем в углеродистых. Окислительное влияние газовой фазы (CO_2 и продуктов распада) компенсируется раскислителями, содержащимися в металлическом стержне или чаще в покрытии. Для уменьшения возможного выделения водорода электроды перед сваркой следует прокалывать при повышенных температурах ($450\ldots 500^\circ\text{C}$, длительность 2 ч). Сварку выполняют на постоянном токе обратной полярности.

При сварке в инертных защитных газах и смесях на основе аргона снижается выгорание Cr и других легирующих элементов высокохромистых сталей. При изготовлении изделий малых толщин и выполнении корневого валика в многослойных швах металла большой толщины в основном применяют сварку неплавящимся вольфрамовым электродом, а присадочный материал подбирают в зависимости от требуемого состава наплавленного металла. При этом способе сварки потери активных легирующих элементов, таких как титан и алюминий, улучшающих свойства металла шва, незначительны.

Присутствие азота в металле шва улучшает свойства большинства таких сталей, однако содержание его более 0,08% может вызывать пористость, поэтому необходимо обеспечивать хорошую газовую защиту и не допускать большего количества азота в защитном газе.

Сварка плавящимся электродом в углекислом газе обеспечивает достаточную защиту сварочной зоны от воздуха, но оказывает значительное окислительное воздействие на металл. Для предупреждения выгорания основных элементов, определяющих свойства металла шва, в электродную проволоку необходимо вводить специальные раскислители.

Сварка под флюсом также требует применения специальных сварочных материалов. Окислительные высококремнистые, высокомарганцовистые флюсы не пригодны для сварки высокохромистых сталей в связи с окислением не только активных легирующих элементов, но и основного легирующего элемента — хрома, кроме того, повышение концентрации кремния, а также марганца в высокохромистом металле уменьшает его пластичность и вязкость.

Фторидные бескислородные флюсы не обеспечивают достаточно хорошего формирования швов. Поэтому для сварки высокохромистых сталей рекомендуют применение либо безокислительного, высокоосновного флюса, не влияющего при плавлении на состав шва, либо слабоокислительного (за счет введения в низкокремнистый флюс некоторого количества окислов железа) флюса в комбинации со специальными проволоками типа Св-15Х12НМВФБ и Св-15Х12ГНМВФ.

При выборе вида сварки, сварочных материалов и режимов сварки высокохромистых сталей, особенно жаропрочных, необходимо учитывать, что даже небольшие отклонения в химическом составе металла швов (по ряду элементов в пределах десятых долей процента) могут приводить к значительному изменению их служебных свойств.

При использовании аустенитного или аустенитно-ферритного наплавленного металла обязательно необходимо учитывать и долю основного металла, попадающего в металл шва и тем самым влияющего на его состав, структуру и свойства.

Сварка мартенситных хромистых сталей. Эти стали (13X11H2B2MФ, 15X11MФ, 18X11MНФБ и др.) в большинстве случаев имеют повышенное содержание углерода, некоторые из них дополнительно легированы никелем. Как уже было отмечено, на диаграмме Fe–Cr имеется замкнутая область γ -твердых растворов с объемноцентрированной кубической решеткой (см. рис. 5.10). Область γ ограниченная справа двумя линиями, замыкающими гетерогенный участок $\delta + \gamma$. При низком содержании углерода легирование до 12% Cr способствует устойчивости аустенита, расширению его температурной области и снижает критические скорости охлаждения, что приводит к формированию в стали однофазной мартенситной структуры при охлаждении от 800°C со скоростью менее 1°C/с.

Повышенная склонность к хрупкому разрушению в состоянии закалки усложняет технологию сварки мартенситных сталей.

При содержании углерода более 0,10% мартенситные стали склонны к образованию холодных трещин из-за высокой степени тетрагональности кристаллической решетки мартенсита. Снижение содержания углерода повышает вязкость мартенсита, однако образование по границам зерен мартенсита структурно свободного δ -феррита может вызвать высокую хрупкость сталей.

Трещины в сварных соединениях мартенситных сталей могут появляться в процессе непрерывного охлаждения в интервале температур от начала M_n до окончания M_k мартенситного превращения. С увеличением содержания углерода температуры M_n и M_k понижаются, что приводит к возрастанию твердости и хрупкости мартенсита, поэтому содержание углерода в хромистых мартенситных сталях должно быть меньше 0,20%.

Для предотвращения образования холодных трещин при сварке 11...12%-ных хромистых сталей применяют предварительный и сопутствующий подогрев до температур, соответствующих интервалу мартенситного превращения — 200...450°C. Температура подогрева должна быть тем выше, чем выше склонность стали к закалке, но при этом снижается скорость охлаждения в интервале температур образования карбидов, что может привести к отпускной хрупкости металла околошовной зоны. Кроме того, высокая температура подогрева вызывает рост зерна, сегрегацию примесей на границах зерен и, как следствие, снижение пластичности сварных соединений.

Малоуглеродистые хромистые стали, дополнительно легированные никелем, образуют при закалке мартенсит, отличающийся вследствие низкого содержания углерода высокой пластичностью и вязкостью. Однако для предупреждения водородной хрупкости при сварке необходим предварительный

и сопутствующий подогрев до 100...200°C. Улучшению свариваемости этих сталей способствует также остаточный аустенит.

Сварку хромистых сталей мартенситного класса можно осуществлять по двум схемам. При сварке по первой схеме сварочные материалы должны обеспечивать максимальное сходство химических составов металла шва и основного металла и после соответствующей термической обработки сварное соединение имеет свойства, приближающиеся к свойствам основного металла.

Когда подогрев или последующий отпуск не возможны, сварку осуществляют по второй схеме, используя сварочные материалы, образующие металл шва с аустенитной или аустенитно-ферритной структурой. В этом случае шов имеет высокие пластические свойства, но сварное соединение структурно неоднородно. Неоднородность увеличивается с течением времени, когда изделие эксплуатируется при повышенных температурах. При этом не обеспечена и равнопрочность сварочного соединения.

Для деталей из легированных мартенситных сталей применяют в основном ручную дуговую сварку штучными электродами, обеспечивающими получение сварных швов, близких по химическому составу к основному металлу и содержащих 10...12% Cr, до 0,8% Ni и до 1% Mo. Пониженное содержание углерода (0,02...0,08%) обеспечивает высокую вязкость металла швов. Наряду с электродами, близкими по химическому составу к мартенситным сталям, применяют аустенитные Cr-Ni электроды.

Для автоматической сварки используют проволоку типа Св-15Х12НМВФБ и Св-15Х12ГНМБФ и безокислительные, высокоосновные флюсы.

Независимо от толщины изделий сварные соединения хромистых мартенситных сталей, как правило не позже чем через 2 ч после сварки, подвергают (без охлаждения ниже температуры подогрева) термическому отпуску при 750...860°C (в зависимости от химического состава стали) для снятия остаточных напряжений и улучшения механических свойств. В некоторых случаях перед отпуском производится охлаждение до 100°C для завершения $\gamma \rightarrow \alpha$ (М) превращения. Температура отпуска выбирается не выше значений критической точки A_1 .

Сварка мартенситно-ферритных хромистых сталей. Хромистые стали, содержащие 13...14% Cr, с частичным $\gamma \rightarrow \alpha$ (М) превращением относят к мартенситно-ферритным. Стали марок 08Х13, 12Х13, 20Х13, 08Х14МФ и др., особенно с пониженным содержанием углерода, находят широкое применение при изготовлении химических аппаратов и энергетического оборудования.

Количество δ -феррита в сталях повышается с увеличением содержания Cr и снижением концентрации С. При температурах выше 600°C в случае достаточно низкой скорости охлаждения в структуре появляется феррит. Ниже 400°C при быстром охлаждении наблюдается превращение аустенита в мартенсит. Количество образовавшегося мартенсита в каждом из указанных температурных интервалов зависит главным образом от скорости охлаждения и содержания углерода в стали.

Диаграмма распада аустенита этих сталей имеет две области превращения: в интервале 600...930°C образуется ферритно-карбидная структура,

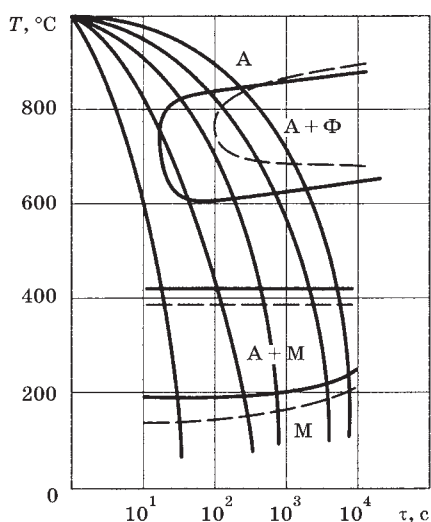


Рис. 5.11

Термокинетическая диаграмма распада аустенита при непрерывном охлаждении стали, содержащей 13% хрома и разное количество углерода:

А — аустенит; М — мартенсит; Ф — феррит;
— — 0,08% С; - - - - 0,20% С.

а в интервале 120...420°C — мартенситная (рис. 5.11). Распад аустенита в каждом из указанных температурных интервалов зависит главным образом от скорости охлаждения. При охлаждении с малой скоростью превращение аустенита происходит преимущественно в высокотемпературном интервале с образованием феррита и карбидов. Повышение скорости охлаждения способствует переохлаждению аустенита до температуры начала мартенситного превращения (420°C) и полному превращению в мартенсит. Увеличение содержания углерода приводит к сдвигу границ превращения аустенит — феррит вправо, а превращения аустенит — мартенсит в область более низких температур. В результате этого в сталях с содержанием углерода 0,10–0,25% полное мартенситное превращение происходит при меньших скоростях охлаждения, чем в сталях с низким содержанием

углерода. Высокая склонность этих сталей к подкалке вызывает образование холодных трещин в сварных соединениях.

Образование значительного количества феррита в структуре металла околошовной зоны уменьшает склонность сварных соединений к холодным трещинам. Это характерно для 13%-ных хромистых сталей с содержанием углерода менее 0,1%. Количество δ-феррита в структуре околошовного металла зависит от температуры нагрева. В металле участка зоны термического влияния, примыкающего к линии сплавления, структура δ-феррита может стать основной. Ширина этого участка мало зависит от температуры подогрева, но возрастает с погонной энергией сварки. Увеличение ширины участка с большим количеством δ-феррита отрицательно влияет на ударную вязкость сварных соединений этих сталей.

Сварку мартенситно-ферритных сталей производят в основном с предварительным и сопутствующим подогревом. Даже при сварке сталей с низким содержанием углерода рекомендуют подогрев до 150...250°C и проведение последующей термической обработки. Дополнительное легирование карбидообразующими элементами связывает углерод и уменьшает его отрицательное влияние. Тетрагональность мартенсита уменьшается, и сталь, легированную дополнительно M_n и V , можно сваривать без подогрева.

Для мартенситно-ферритных сталей применяют различные способы сварки: ручную штучными электродами, в защитных газах и автоматическую под флюсом. Для сварки сталей 08X13, 08X14МФ, 12X13 и 20X13 наиболее часто применяют сварочные электроды и проволоки, обеспечивающие получение аустенитного наплавленного металла (электроды типа Э-10Х25Н13Г2, прово-

локи типа Св-07Х25Н12Г2Т), поэтому прочностные свойства сварных соединений ниже по сравнению с основным металлом. Равнопрочность сварных соединений достигается при использовании для сварки электродов и проволок, обеспечивающих получение металла швов с мартенситной структурой. В этом случае присадочные материалы по химическому составу близки к основному металлу. Например, для ручной дуговой сварки стали 14Х17Н2 применяют электроды типа Э-10Х18Н2, а при аргонодуговой и автоматической сварке под флюсом — проволоки типа Св-08Х18Н2ГТ и Св-08Х14ГНТ.

Сварные соединения мартенситно-ферритных сталей должны быть подвергнуты термическому отпуску для «смягчения» структур закалки и снятия остаточных напряжений. При формировании мартенситной структуры ударная вязкость сварных соединений 13%-ных хромистых сталей снижается до 0,05...0,10 МДж/м². Последующий отпуск при 650...700°C приводит к выделению углерода с образованием карбидов, в результате тетрагональность мартенсита уменьшается и ударная вязкость возрастает до 1 МДж/м².

Сварка ферритных хромистых сталей. В соответствии с диаграммой Fe—Cr эти стали (08Х17Т, 15Х25Т, 08Х23С2Ю и др.) содержат более 12% Cr. Положение границы γ -области на диаграмме Fe—Cr изменяется в зависимости от содержания углерода. При увеличении содержания углерода граница γ -области перемещается в сторону больших концентраций Cr, что связано с уменьшением количества Cr в δ -феррите вследствие образования стабильных карбидов. В связи с этим ферритные стали, содержащие углерод, легируют Cr в количестве не менее 16%. По сопротивляемости коррозии ферритные стали не уступают хромоникелевым аустенитным сталям и при дополнительном легировании Al и Si могут быть использованы для изготовления оборудования, работающего в условиях окисления при температурах до 1200°C.

Высокая чувствительность к надрезу при нормальной температуре затрудняет применение ферритных сталей для изготовления оборудования, работающего в условиях ударных и знакопеременных нагрузок. Для хромистых ферритных сталей, произведенных в открытых печах, обычно устанавливают минимально допустимые значения прочности (370...460 МПа) и не предъявляют требований по ударной вязкости. Повышение пластичности хромистых ферритных сталей возможно за счет ограничения в их составе суммарного содержания примесей внедрения до 0,015...0,020% при выплавке в вакуумных печах.

Основная особенность при сварке плавлением этих сталей состоит в том, что в связи с отсутствием структурных превращений не удастся предотвратить интенсивный рост зерна в околошовной зоне. Наиболее крупные зерна образуются на участке перегрева. В слое, примыкающем к линии сплавления и нагретом выше 1000°C, происходит охрупчивание. Ударная вязкость металла в зоне термического влияния сварных соединений близка к нулю. Охрупчивание ферритных сталей возможно также после выдержки в интервалах температур, способствующих образованию σ -фазы (550...850°C), и 475°C — хрупкости (400...550°C), при которой ударная вязкость стали снижается с 0,9 до 0,3 МДж/м².

Во избежание образования трещин сварку рекомендуют проводить с подогревом до 150...200°C. Однако подогрев отрицательно влияет на пластичность металла с ферритной структурой, так как уменьшает скорость охлаждения

и увеличивает продолжительность выдержки в интервале температур, близких к 475°C. Ускоренное охлаждение со скоростями 100°C/с повышает пластичность стали, имеющей структуру перегрева.

Сварку ферритных сталей также осуществляют по двум схемам. При сварке по первой схеме получают металл шва с мартенситно-ферритной структурой, при этом хрупкость может наблюдаться и в металле шва. Для предупреждения холодных трещин сварку выполняют с предварительным и сопутствующим подогревом до 120...180°C. Если для сварки применяют электроды и проволоки, близкие по составу основному металлу с обычным содержанием примесей, то пластичность и ударная вязкость металла шва низкие.

При сварке сталей с высоким содержанием хрома (25...30%) по другой схеме получают в шве двухфазную, аустенитно-ферритную структуру, используя хромоникелевые электроды и проволоки. В качестве присадочных материалов для ручной дуговой сварки, сварки под флюсом и в защитных газах применяют также хромоникелевые сварочные электроды и проволоки, обеспечивающие получение наплавленного металла типа Х25Н13 с аустенитной структурой. Применение аустенитных электродов и проволок для сварных соединений сталей с низким содержанием примесей обеспечивает получение металла шва с высокой пластичностью и ударной вязкостью.

При наличии требований к сварным соединениям по стойкости против межкристаллитной коррозии при аргонодуговой сварке и автоматической сварке под флюсом применяют присадочные материалы, легированные Nb или Ti и Al (электроды типа Э-10Х17Т и проволоку типа Св-10Х17Т).

В связи с отсутствием полиморфных превращений невозможно измельчить структуру ферритных сталей методами термической обработки и повысить пластичность сварных соединений. Термическая обработка, применяемая для сварных соединений сталей ферритного класса, обеспечивает в основном снижение уровня остаточных напряжений. Отжиг при 760°C является универсальным для сталей ферритного класса. При этой температуре практически полностью релаксируют остаточные напряжения. Этот режим способствует также снижению склонности к межкристаллитной коррозии. Хрупкость при 475°C может быть устранена нагревом до 750...760°C, который практически полностью восстанавливает исходный уровень пластичности стали. Нагрев до более высоких температур не эффективен, так как способствует росту ферритного зерна и появлению хладноломкости при нормальной температуре вследствие формирования крупнозернистой структуры.

5.3.3. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ ХРОМНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ

Хромоникелевые стали обычно содержат Cr и Ni более 18 и 7% соответственно и другие легирующие добавки.

Структура хромоникелевых сталей определяется соотношением элементов ферритизаторов (Cr, Mo, Nb, Si) и аустенизаторов (Ni, C, Mn, N) и может зависеть от режима термообработки.

Структурные превращения в хромоникелевых сталях показаны на диаграмме состояния Fe-18% Cr-8% Ni-C (рис. 5.12).

Рис. 5.12

Псевдобинарная диаграмма состояния системы Fe–Cr–Ni–C, содержащей 18% Cr и 8% Ni:

Ж — жидкость; C, E, I, K, S — характерные точки диаграммы; α , δ , σ — полиморфные модификации.

При содержании в стали до 0,1% C кристаллизация начинается с образования в расплаве кристаллов δ -феррита. Затем происходит образование смеси δ -феррит, аустенит и жидкость. После затвердевания образуется смесь аустенит и δ -феррит и при дальнейшем охлаждении происходит превращение δ -феррита в аустенит. Охлаждение ниже предела растворимости углерода в аустените (линия SE) приводит к выделению карбидов и затем, при дальнейшем охлаждении ниже линии SK, происходит образование тройной смеси из зерен аустенита, феррита и карбидов. Окончательная структура этих сталей зависит от соотношения содержания хрома и никеля.

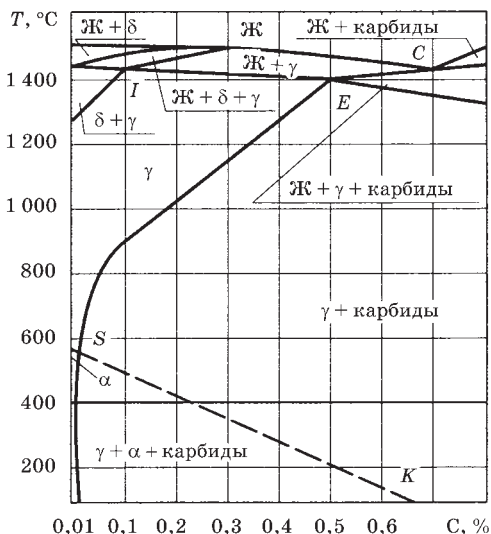
По *структуре, составу и назначению* различают следующие основные группы этих сталей:

- аустенитные стали:
 - стабильно аустенитные жаропрочные стали — 1X16H13M2Б, X14H16Б, X12H20T3P, 1X15H35BTP и др.;
 - метастабильные аустенитные стали — 08X18H10T, 08X18H12Б, 03X16H15M3 и др.;
- аустенитно-ферритные коррозионно-стойкие стали — 08X22H6T, 03X23H6M2 и др.;
- аустенитно-мартенситные коррозионно-стойкие стали — 07X16H6, 08X17H5M3 и др.

Сварка аустенитных сталей. Эти стали используют при изготовлении аппаратов, работающих при температурах 500...700°C и в агрессивных средах. Структура этих сталей состоит из стабильного однофазного твердого раствора хрома и никеля в аустените с содержанием феррита не выше 2%.

В зависимости от типа *легирования и упрочнения* аустенитные стали могут быть:

- *гомогенные* — однофазные, не имеющие структурных превращений при изменении температуры и не упрочняемые термообработкой. В этих сталях (10X14H18B2BP1, 10X14H16Б, X16H13M2Б и др.) содержится C до 0,12%, Cr до 18%, Ni до 20%, W до 3%, Nb и Mo до 1,5%. Упрочнение происходит вследствие повышения уровня легирования твердого раствора;
- *гетерогенные* — упрочняемые термообработкой (закалка и старение). В этих сталях (X12H20T3P, 1X15H25M6A, 20X25H20C2, 10X15H35BT и др.)



содержится С до 0,2%, Cr до 25%, Ni до 35%, W, Mo до 5%, Ti до 3% и Mn, Si до 1,5%. Упрочнение происходит за счет выделения карбидных или интерметаллидных (Fe_2W , Fe_2Mo , Fe_2Ti и др.) фаз.

Основными дефектами, возникающим при сварке этих сталей, являются горячие трещины, которые обусловлены значительными деформациями и напряжениями в сварных соединениях, в связи с большим коэффициентом теплового расширения, малой теплопроводностью и высокой прочностью при повышенных температурах. Кроме того, формирование крупнозернистой столбчатой структуры в металле шва в сочетании с имеющейся ликвационной неоднородностью по Cr, Ni, Nb, В и С способствует образованию легкоплавких карбидных и боридных эвтектик по стыкам зерен.

Эти процессы, во-первых, обуславливают снижение пластичности в температурном интервале хрупкости (ТИХ) и возникновение горячих трещин кристаллизационного типа в интервале температур 1200...1250°C; во-вторых, приводят к образованию горячих трещин в твердой фазе (1200...1000°C) в результате межзеренной высокотемпературной деформации и, в-третьих, вызывают образование горячих трещин в околосшовной зоне по строчечным выделениям легкоплавких примесей и в металле шва по ликвационным прослойкам при многослойной сварке.

Аустенитные жаропрочные стали склонны также к образованию трещин при термообработке после сварки в интервале температур от 600 до 800°C в результате сосредоточения деформаций вблизи концентраторов напряжений.

Кроме того, особенностью метастабильных аустенитных жаропрочных сталей является охрупчивание при повышенных температурах. Швы, содержащие ферритную фазу в количестве от 8 до 10%, склонны к 475°C хрупкости, вызванной длительным нагревом в диапазоне температур от 400 до 500°C, и охрупчиванию в результате выделения σ -фазы при температурах от 650 до 900°C по схеме $\delta\text{-Fe} \rightarrow \text{Me}_{23}\text{C}_6 + \alpha\text{-фаза}$. Для устранения охрупчивания применяют термообработку (аустенизацию — нагрев выше линии SK до 1100...1150°C), при которой происходит растворение карбидов.

Повышение сопротивляемости образованию горячих трещин в шве в первую очередь достигают за счет выбора состава сварочных материалов. При сварке гомогенных аустенитных сталей используют аустенитно-стабильные сварочные материалы с минимальным содержанием серы и фосфора, содержащие карбидные и боридные фазы, дополнительно легированные Mo и Mn и максимально приближающие состав шва к составу основного металла. При сварке гетерогенных аустенитных сталей применяют аустенитно-ферритные сварочные материалы с регламентированным содержанием феррита в наплавленном металле шва (до 4%) в сочетании с дополнительной термообработкой на аустенизацию.

При выборе режима сварки для уменьшения вероятности образования горячих трещин основное внимание уделяют форме изотерм кристаллизации, стремясь получить более круглую форму хвостовой части сварочной ванны за счет уменьшения скорости сварки. Чем больше радиус изотермы плавления, тем больше сопротивляемость образованию горячих трещин, что связано с углом встречи кристаллитов и выдавливанием ликвационных примесей на поверхность ванны.

Повысить сопротивляемость образованию горячих трещин можно также с помощью специальных технологических приемов: электромагнитного перемешивания металла сварочной ванны, охлаждения околошовной зоны или подачи в сварочную ванну нетоковедущей присадочной проволоки.

Ручную дуговую сварку выполняют электродами с фтористо-кальциевым покрытием на постоянном токе обратной полярности с минимальным напряжением на дуге для снижения выгорания легирующих элементов. Многопроходную сварку ведут, обеспечивая полное остывание предыдущего валика. В зависимости от условий работы конструкции применяют электроды, обеспечивающие содержание в шве ферритной фазы в количестве 3...5% (Э-10Х18Н11М2Ф, Э-10Х18Н10В2Б) или 2...4% карбидов (Э-12Х15Н25М6, Э-30Х13Н35В3Б2).

Автоматическую сварку под флюсом выполняют под фторидными безокислительными флюсами. Проволоки выбирают по составу основного металла с учетом получения требуемой структуры металла шва, дополнительно легированные Мо и Мп для уменьшения склонности к образованию горячих трещин (Св-08Х16Н8М2, Св-10Х16Н25АМ6 или Св-06Х15Н35Г7М3Т). Сварку ведут проволоками малого диаметра — 2...3 мм, длинными швами малого сечения с плавным переходом к основному металлу и минимальной долей участия основного металла в металле шва.

Сварку в защитных газах аустенитных хромоникелевых сталей толщиной до 7 мм и корневых швов при большой толщине ответственных изделий выполняют непрерывно горящей и импульсной дугой вольфрамовым электродом в инертных газах (аргон, гелий) без присадки или с присадочной проволокой, соответствующей составу основного металла. Импульсная дуга изменяет условия кристаллизации металла шва, повышая сопротивляемость образованию горячих трещин. Сварку плавящимся электродом ведут в инертных газах (аргон, гелий) и газовых смесях инертных или инертных с активными газами (Аг с 15% CO₂, Аг с 5% N₂, Аг с 5% O₂). Состав плавящегося электрода выбирают по составу основного металла. Для уменьшения выгорания легирующих элементов предпочтительно применять режимы сварки, обеспечивающие струйный перенос электродного металла.

Применяется также пламенная сварка и сварка погруженной дугой.

Электрошлаковую сварку ведут с использованием фтористых безкислородных флюсов, часто с дополнительной защитой аргоном. Проволоки выбирают по составу основного металла. Малая скорость сварки и рафинирование металла шва позволяют получить аустенитный шов без образования горячих трещин. Основным недостатком процесса является перегрев металла и большая ширина околошовной зоны.

Термообработка после сварки зависит от условий работы конструкции. Если сварная конструкция работает при температурах менее 500°C, то проводят только стабилизирующий отжиг для снятия остаточных напряжений при температуре 600...800°C. Если конструкция работает при температурах более 500°C, то выполняют термообработку (нагрев до 1100...1150°C и быстрое охлаждение) для растворения хрупких фаз в аустенитной матрице. После этого проводят стабилизацию или отпуск для получения требуемых свойств сварных соединений.

Аустенитно-ферритные хромоникелевые стали. Стали марок 08X22H6T, 03X22H6M2, 08X21H6M2T и другие применяют при изготовлении элементов химических аппаратов, работающих под нагрузкой в агрессивных средах при температурах до 350°C. При поставке они имеют аустенитно-ферритную структуру с содержанием феррита от 40 до 60%. Основными легирующими элементами в этих сталях являются: С до 0,12%, Cr до 23%, Ni до 6%, Mn, Si, Ti до 1%.

Основной особенностью сварки этих сталей является превращение аустенита в δ -феррит в зоне нагретой до температуры выше 1100°C.

Конечное соотношение структурных составляющих в шве и околошовной зоне зависит от температуры нагрева и скорости охлаждения при сварке. Ферритная фаза обуславливает высокую сопротивляемость горячим трещинам, но одновременно повышает опасность охрупчивания при температурах 450...550°C и возможность образования хрупкой σ -фазы при температурах 700...800°C. Кроме того, наблюдается повышенный рост зерна ферритной составляющей в околошовной зоне. Размеры и количество ферритной фазы определяется погонной энергией сварки и соотношением феррита и аустенита в основном металле. Повышенное содержание титана увеличивает чувствительность к перегреву, так как способствует аустенитно-ферритному превращению.

Для аустенитно-ферритных хромоникелевых сталей применяют все способы сварки плавлением. Подготовку кромок выполняют механической обработкой, чтобы исключить тепловое воздействие термической резки на основной материал.

Применяемые сварочные материалы должны обеспечивать получение металла шва с аустенитно-ферритной структурой. Максимальную прочность и пластичность металла шва достигают при примерно равном соотношении аустенитной и ферритной фаз.

При сварке используют электроды с фтористо-кальцевым покрытием, низкокремнистые флюсы, аргон и смеси газов, обеспечивающие состав наплавленного металла близкий к основному металлу. Проволоки для сварки в защитных газах и под флюсом выбирают по составу основного металла, дополнительно легированные Mn, Mo, Nb (Св-06X21H7БГ, Св-03X21H10АГ5, Св-05X20H9ФБС и др.) для повышения стойкости против образования горячих трещин.

Режимы сварки в основном выбирают с целью обеспечить минимальную погонную энергию.

Для улучшения пластических свойств сварных соединений аустенитно-ферритных хромоникелевых сталей после сварки рекомендуют проводить термообработку по циклу закалки от 1000°C с охлаждением в воде.

Аустенитно-мартенситные стали. Стали марок 07X16H6, 08X15H8Ю, 08X17H5M3 и др. используют для изготовления изделий, работающих в солевых средах, в атмосферных условиях и при низких температурах до -190°C.

Стали содержат С до 0,1%, Cr до 18%, Ni до 8%, Mo до 3%, Si и Mn до 1%, Al до 1,5%. Химический состав этих сталей обеспечивает начало мартенситного превращения при температурах 20...60°C.

Соотношение фаз аустенита и мартенсита зависит от исходной термообработки и пластической деформации. Обычно эти стали подвергают закалке

ке от 1000°C, обработке холодом при –70°C в течение 2 часов и отпуску (старению) при 300...400°C. После этой термообработки сталь имеет в основном мартенситную структуру, высокую прочность и достаточную пластичность ($\sigma_{\text{в}} = 1000...1600$ МПа, KCV — 1,5 МДж/м²).

При сварке этих сталей основной особенностью является образование в околошовной зоне широкого участка со структурой аустенита. Так как при нагреве в диапазоне температур 650...750°C происходит превращение мартенсит–аустенит, интенсивное выделение карбидов по границам зерен в интервале 550...900°C и выпадение по линии сплавления включений δ -феррита, то на этом участке наблюдается снижение пластичности, прочности и стойкости к межкристаллитной коррозии.

Для восстановления свойств сварных соединений, особенно для работы при низких температурах, необходимо проводить полную термообработку сварного соединения по циклу термообработки основного металла (закалка, обработка холодом, отпуск). Если невозможно провести закалку, то ограничиваются обработкой холодом и отпуском для частичного восстановления свойств, особенно ударной вязкости.

Применяют ручную дуговую сварку, сварку в защитных газах и иногда сварку под флюсом.

Сварку в среде защитных газов при малых толщинах выполняют неплавящимся электродом без присадки, а при больших — с подачей присадочного материала или плавящимся электродом. В качестве защитных газов применяют аргон и смеси газов.

Для обеспечения высокой прочности сварного соединения применяют проволоки аустенитно-мартенситные типа Св-08Х17Н5МЗ, Св-09Х15Н9Ю и Св-07Х16Н6, а также проводят последующую термообработку. При сварке высокопрочных сталей могут возникнуть холодные трещины в околошовной зоне. Предварительный и сопутствующий подогрев до 250...550°C могут предупредить их образование.

Для предупреждения образования горячих трещин аустенитно-мартенситные стали обычно сваривают двухфазными аустенитно-ферритными швами. С этой же целью применяют способы и режимы сварки, способствующие измельчению зеренной структуры металла шва и уменьшению напряжений усадки.

Для получения металла шва с большей пластичностью применяют аустенитный присадочный материал типа Св-01Х19Н18Г10М4 или Св-08Х21Н10Г6, дополнительно легированный Mn и Mo для повышения стойкости против образования горячих трещин и обеспечения работоспособности при низких температурах.

При сварке под флюсом проволоками аустенитно-мартенситного типа используют низкокремнистые флюсы, а при применении аустенитного присадочного материала — фтористые бескислородные флюсы.

Термообработку после сварки выполняют по циклу термообработки основного металла, в основном для обеспечения повышенной коррозионной стойкости за счет растворения карбидов, образующихся в зоне термического влияния.

Особенности сварки сплавов на никелевой основе. Никель — металл без полиморфизма с гранецентрированной кубической кристаллической решеткой,

имеющий плотность 8,8 г/см³ и температуру плавления 1455°C, широко применяется как основа нихромов (70...80% Ni + Cr), пермалоев (80% Ni + Fe), нихроферов (40% Ni + 20% Cr + Fe), монель-металла (70% Ni + Cu) и других сплавов с более сложным легированием. Эти сплавы обладают жаропрочностью и коррозионной стойкостью и длительно работают при температурах 1000...1100°C в газовых, соляных и жидкометаллических средах.

Различают никелевые сплавы *гомогенные* нетермоупрочняемые и *гетерогенные*, термоупрочняемые дисперсионным твердением.

Металл шва при сварке никелевых сплавов имеет однофазную аустенитную структуру. Развитие ликвации при затвердевании сварочной ванны увеличивает протяженность кристаллизационного температурного интервала хрупкости, что при наличии сварочных деформаций и напряжений обуславливает пониженную стойкость к горячим трещинам.

Расширяет температурный интервал хрупкости и ликвационная неоднородность, связанная с образованием неравновесных легкоплавких фаз на базе примесей. Например, эвтектика NiO–NiS затвердевает при температуре 645°C, образуя жидкие прослойки по границам кристаллитов, где и возникают горячие трещины.

В центре швов при сварке на больших скоростях формируется стык двух фронтов кристаллизации с большим углом между осями кристаллитов и сильно выраженной зональной ликвацией. При сварке на малых скоростях в центре шва образуются осевые кристаллиты, по продольным граням которых возникают две зоны срастания боковых и осевых кристаллитов. Такое строение шва также характеризуется пониженной технологической и эксплуатационной прочностью.

В металле околошовной зоны гомогенных сплавов под действием термического цикла сварки происходит укрупнение зерна, а в гетерогенных сплавах — растворение упрочняющих фаз в зоне, нагреваемой выше 900°C, что обуславливает снижение твердости и жаропрочности.

При сварке сплавов, термоупрочненных в состоянии поставки, происходит укрупнение упрочняющих фаз (перестаривание структуры) и снижение механических свойств. На линии сплавления наблюдается оплавление упрочняющих фаз, приводящее к образованию горячих микротрещин и падению жаропрочности. Развитие этих процессов зависит от длительности высокотемпературного нагрева, исходного состояния сплава и его химического состава, определяющего стабильность фаз.

При сварке гомогенных никелевых сплавов возможно образование кристаллизационных, а также подсолидных горячих трещин. Последние образуются после затвердевания в результате развития высокотемпературных межзеренных сдвигов в металле шва с неравновесной структурой.

При сварке гетерогенных сплавов горячие трещины возникают не только в шве, но и в околошовной зоне из-за наличия скоплений легкоплавких фаз (сульфидов, боридов и т. д.), значительных температурных деформаций и низкой пластичности крупнозернистой структуры, формирующейся в исходном состоянии при нагреве под закалку.

При сварке плавлением гомогенных сплавов главным при выборе режимов является сохранение жаропрочных свойств сплавов в зоне сварки, а при

сварке гетерогенных сплавов — дополнительно предотвращение трещин при термообработке. Качественные сварные соединения гомогенных никелевых сплавов имеют высокие значения жаропрочности и сопротивляемости термической усталости. Более существенно снижаются жаропрочные свойства сварных соединений гетерогенных сплавов.

Общий принцип выбора режимов — это максимально возможное сокращение времени высокотемпературного нагрева, увеличение скорости охлаждения и уменьшение размеров сварочной ванны, снижение сварочных напряжений.

Однако при однопроходной дуговой сварке с большой скоростью металла средних и больших толщин повышается склонность к образованию горячих трещин в околошовной зоне. Трещины этого типа вызваны малой теплопроводностью и большой жаропрочностью сплавов, что обуславливает развитие наибольшего темпа растягивающих деформаций в околошовной зоне в период затвердевания легкоплавких ликвационных прослоек. В этом случае для предотвращения горячих трещин при дуговой сварке рекомендуют снижать скорость сварки.

При выборе сварочных материалов необходимо предотвратить горячие трещины в шве и ЗТВ, трещины при термообработке, а также обеспечить равную жаропрочность сварных соединений и основного металла.

При сварке гомогенных сплавов применяют присадочные проволоки, близкие по химическому составу к основному. Отличия состоят в увеличении доли элементов, имеющих высокую энергию активации диффузии (Mo, W, Mn), и в уменьшении упрочняющих добавок (Ti, Al).

При сварке гетерогенных сплавов с большим содержанием Ti и Al применяют присадочные проволоки, в которых часть титана заменена ниобием. Это обеспечивает снижение интенсивности упрочнения шва при нагреве под закалку.

Основные металлургические способы предотвращения горячих трещин сводятся к оптимизации химического состава шва, повышению чистоты сплавов по примесям, использованию для сварки сплавов, поставляемых в закаленном (аустенитизированном) или перестаренном состоянии, когда вследствие понижения прочности сплава и укрупнения выделенной упрочняющей фазы становятся менее опасными высокотемпературные деформации в температурном интервале хрупкости.

Основанные технологические способы предотвращения трещин при сварке заключаются в снижении до минимума погонной энергии (многопроходная сварка неплавящимся электродом, импульсная дуга), ограничении скорости сварки, применении электромагнитных полей, теплоотводящей оснастки, дополнительной охлаждающей среды и других внешних воздействий для измельчения структуры, уменьшения химической неоднородности и ликвации в металле шва.

Выбор режимов термообработки после сварки определяется исходной структурой сплава.

Для гомогенных сплавов рекомендуется аустенитизация сварных узлов при температуре 1050–1200°C, которая приводит к растворению избыточных

фаз, а также к снятию сварочных напряжений, что повышает работоспособность сварных соединений в коррозионно-активных средах.

Для гетерогенных дисперсионно-упрочняемых сплавов термообработка после сварки включает аустенитизацию и стабилизирующий отжиг. Последующее двухступенчатое старение при 900°C, 8 ч и при 850°C, 15 ч приводит к выделению упрочняющей фазы в объемах зерен и стабилизирует структуру для высокотемпературной эксплуатации.

Однако при нагреве сварных конструкций под закалку (1200...1250°C) и выдержке в интервале дисперсионного твердения под действием внутренних напряжений возможно возникновение трещин. Образование трещин при термообработке сварных конструкций обусловлено оплавлением границ зерен в околошовной зоне при сварочном нагреве, которое вызывает сегрегацию примесей на границах, и развитием под действием остаточных сварочных напряжений высокотемпературной ползучести. Это приводит к хрупкому разрушению сварного соединения в околошовной зоне параллельно оси шва и поперек шва (трещины типа частокол), а при сварке толстолистного металла — к образованию в околошовной зоне трещин, ориентированных перпендикулярно линии сплавления.

Наиболее склонны к трещинам при термообработке сварные соединения повышенной жесткости, а также соединения из сплавов с суммарным содержанием Ti и Al более 4%, имеющих максимальный темп старения.

Сплавы, легированные Nb вместо Ti, с меньшей интенсивностью старения и с упрочняющей фазой Ni₃ (Nb, Al), не склонны к образованию трещин в процессе термообработки. Они эффективны и в качестве сварочных материалов при соединении сплавов, упрочненных Ti и Al.

Предотвращают возникновение трещин при термообработке все способы измельчения зерна и снижения сегрегаций в сварном соединении, сведение к минимуму времени высокотемпературного нагрева при сварке и повышение скорости нагрева при проведении послесварочной термообработки, что препятствует развитию старения на стадии нагрева.

Длительная высокотемпературная эксплуатация приводит к снижению предела длительной прочности и пластичности основного металла и сварных соединений (охрупчивание), причем интенсивность их снижения в шве и околошовной зоне выше. Это обусловлено изменением упрочняющей фазы, преобразованием первичных карбидов MeC во вторичные Me₆C и Me₂₃C₆, имеющие пластинчатую форму и выпадающие на границах, диффузионным окислением сплавов по межзеренным границам и различной величиной зерна в результате сварочного перегрева.

Чем короче длительность высокотемпературного нагрева при сварке и меньше разница в сопротивлении деформированию металла шва, околошовной зоны и основного металла, тем выше эксплуатационные свойства и свариваемость сплавов.

Воздействие агрессивных сред вызывает охрупчивание металла сварных соединений под влиянием сульфидной и межкристаллитной коррозии.

Сульфидная коррозия связана с образованием легкоплавких сульфидов никеля NiS (температура плавления 810°C) при наличии в высокотемпературном

газовом потоке сернистых соединений. Сульфиды имеют большой объем, что вызывает разрыхление металла и проникновение сульфидов по границам зерен, особенно сильное в восстановительных средах, где нет плотных окисных защитных пленок.

Чем крупнее зерно в металле шва и околошовной зоне, больше сварочные напряжения и длительность высокотемпературного нагрева при сварке, тем ниже стойкость сварных соединений против сульфидной коррозии.

Межкристаллитная коррозия сварных соединений сосредоточена в околошовной зоне и развивается вдоль линии сплавления по границам зерен, перенесшим нагрев выше 1250°C и частичное оплавление, а также повторный нагрев либо замедленное охлаждение после сварки в интервале температур $550\ldots 900^{\circ}\text{C}$. Рост зерен при сварочном нагреве приводит к накоплению на границах элементов с малой диффузионной подвижностью и развитию химической неоднородности в металле. При повторном нагреве в этих участках формируются карбиды и интерметаллиды, обедняя окружающий металл легирующими элементами.

Склонность к межкристаллитной коррозии снижают, легируя швы ниобием, исходя из соотношения $\text{Nb}/\text{C} \geq 20$ при эксплуатации соединений ниже 550°C и $\text{Nb}/\text{C} \geq 40$ при более высоких температурах длительной эксплуатации, ограничивая содержание C ($0,03\ldots 0,06\%$) и проводя аустенитизацию сварных соединений.

5.4. СВАРКА ЧУГУНА

5.4.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЧУГУНОВ И ИХ СВАРИВАЕМОСТЬ

Чугунами называют сплавы железа с углеродом при содержании углерода более 2% . Углерод в чугуне находится в виде выделений графита или в виде химического соединения Fe_3C — цементита (рис. 5.13а).

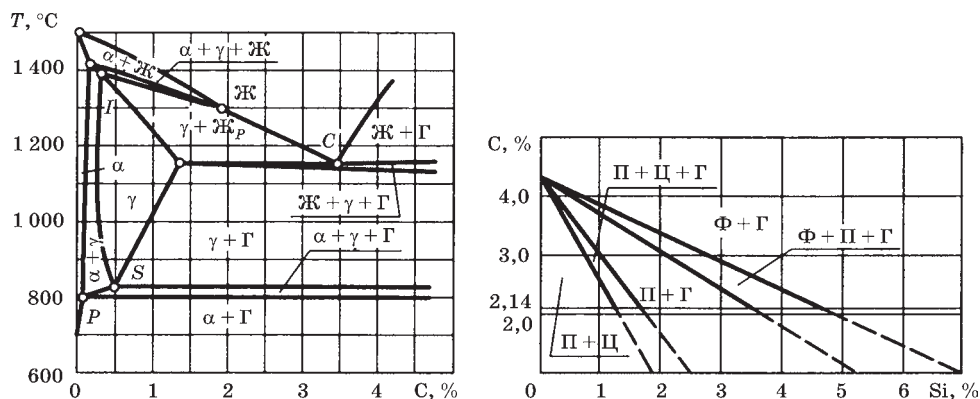


Рис. 5.13

Псевдобинарная диаграмма состояний сплавов Fe-Cr-Si стабильной (графитной) системы при содержании кремния 3% (а) и влиянии концентрации углерода и кремния на структуру чугуна (б):

Ж — жидкость; Ф, α — феррит; γ — аустенит; Г — графит; П — перлит; Ц — цементит; C, I, P, S — характерные точки диаграммы.

Классификация чугунов. В конструкциях применяют в основном серые, высокопрочные и ковкие чугуны. Свойства чугуна во многом обусловлены формой графитовых включений. По *типу легирования, форме графитовых включений*, а также по *структуре матрицы* различают чугуны:

- серый чугун с пластинчатым графитом в ферритной или перлитной матрице;
- высокопрочный чугун с шаровидным графитом в ферритной, перлитной или бейнитной матрице;
- ковкий чугун с хлопьевидным графитом в ферритно-перлитной матрице;
- легированные чугуны с пластинчатым или шаровидным графитом в ферритной, перлитной или аустенитной матрице:
 - хромистые — до 36% Cr (ЧХ16М2);
 - никелевые — до 20% Ni (ЧН19Х3Ш);
 - кремнистые — до 18% Si (ЧС15М4);
 - марганцевые — до 12% Mn (ЧГ8Д3);
 - алюминиевые — до 30% Al (ЧЮ7Х2).

Серый чугун помимо углерода (3,2...3,8%) обычно содержит кремний (1...5%) и марганец (0,5...0,8%). В маркировке серого чугуна указывают его прочность при растяжении. Например, СЧ18 означает: серый чугун с пределом прочности на растяжение 180 МПа.

Высокопрочные чугуны имеют мелкозернистую структуру матрицы и модифицированы магнием, что повышает пластические свойства чугуна. В маркировке высокопрочного чугуна также указывают его прочность при растяжении. Например, ВЧ40 означает: высокопрочный чугун, имеющий предел прочности при растяжении 400 МПа.

Ковкие чугуны имеют графит хлопьевидной формы за счет длительного отжига (томления) белого чугуна при высокой температуре (20...25 ч при 950...1000°C). Маркируют ковкий чугун, указывая временное сопротивление при растяжении и относительное удлинение. Например, КЧ30-6 означает: ковкий чугун с временным сопротивлением при растяжении 300 МПа и относительным удлинением 6%.

Главным процессом, определяющим структуру и свойства чугуна, является *графитизация* — выделение углерода в виде включений свободного графита. Процесс графитизации зависит от скорости охлаждения и химического состава чугунов.

Чугуны являются многокомпонентными сплавами. Легирующие элементы, содержащиеся в чугуне, влияют на структуру металлической матрицы (рис. 5.13б) и могут способствовать графитизации (*графитизаторы* — C, Si, Al, Ni, Co, Cu) или вызывать выделение углерода в виде цементита и других карбидов (*отбеливающие* — S, V, Cr, Sn, Mo, Mn).

Свариваемость чугуна. Основные трудности при сварке чугуна вызваны охрупчиванием сварного шва и зоны термического влияния (отбеливание) при быстром охлаждении после сварки и склонностью к образованию горячих и холодных трещин в связи с присутствием в металле шва примесей, способствующих появлению легкоплавких эвтектик, формированием хрупких структур и наличием высоких сварочных напряжений. Кроме того, интенсивное

выделение газов при сварке вызывает пористость, а повышенная жидкотекучесть чугуна затрудняет формирование шва.

Охрупчивание и вероятность появления холодных трещин уменьшают, используя подогрев металла и присадочные материалы, легированные графитизаторами и обеспечивающие получение в шве серого чугуна. Увеличение включений свободного графита уменьшает величину линейной усадки, следовательно, напряжений при сварке, а также повышает пластичность матрицы, которая имеет ферритную или ферритно-перлитную структуру. Применяют также специальные электродные материалы из стали и цветных металлов для получения пластичного наплавленного металла шва, способствующего уменьшению уровня напряжений в зоне сварки.

Сопротивляемость образованию горячих трещин в металле шва повышают, ограничивая содержание серы и фосфора и обеспечивая более коагулированные выделения графита. С этой целью выбирают соответствующие сварочные материалы и используют подогрев для прохождения графитизации и уменьшения темпа деформации.

Для предупреждения пористости ограничивают содержание водорода, кислорода, азота и СО в металле сварочной ванны. Чтобы уменьшить количество растворенного водорода, очищают свариваемые кромки от ржавчины и применяют флюсы или покрытия, содержащие фтористые соединения. Выделение азота предупреждают, легируя швы титаном и алюминием. Концентрацию СО снижают за счет раскисления сварочной ванны кремнием и алюминием. Дегазации способствуют также подогрев, уменьшение скорости охлаждения и увеличение времени пребывания металла сварочной ванны в расплавленном состоянии.

При больших объемах сварочной ванны для предупреждения вытекания расплавленного металла выполняют формовку места сварки с помощью графитовых пластинок, скрепленных замешанной на жидком стекле формовочной массой, или с помощью формовочных смесей, используемых в литейном производстве.

Нагрев и охлаждение чугуна при сварке обуславливает значительные изменения структуры и свойств как в зоне плавления, так и в околошовной зоне, которая состоит из нескольких участков (рис. 5.14).

Первый участок (неполного расплавления) соответствует жидко-твердому состоянию металла. Твердая фаза имеет структуру аустенита с предельным содержанием углерода. Жидкая фаза при кристаллизации с большой скоростью охлаждения может образовать ледебурит (аустенит + цементит). Аустенит в зависимости от скорости охлаждения затем превращается в троостит или мартенсит. В результате при высокой скорости охлаждения может происходить процесс «отбеливания» чугуна, когда вместо свободного графита образуется цементит.

На втором участке (900...1100°C) в зависимости от скорости охлаждения в металле образуется ледебурит или аустенит с выделениями графита. Причем при большой скорости охлаждения происходит закалка аустенита.

Третий участок соответствует области неполной перекристаллизации металла (700...800°C). При большой длительности пребывания в этом интервале

температур происходит образование чугуна с мелкозернистым ферритом и выделениями графита, а при больших скоростях охлаждения возможна частичная закалка аустенита.

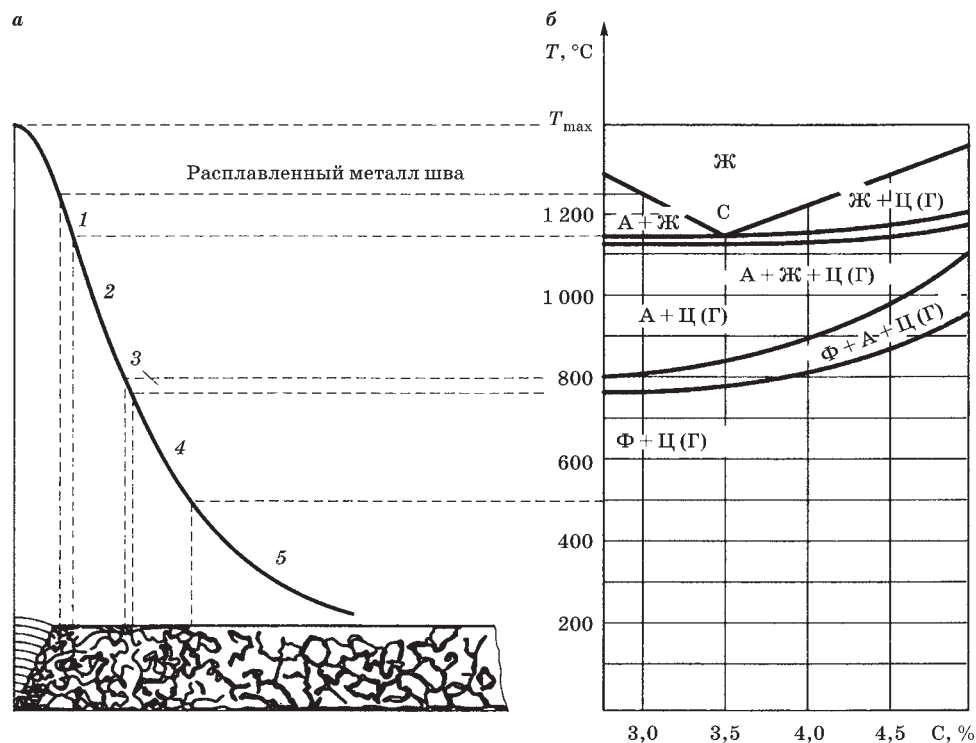


Рис. 5.14

Структурные превращения в околошовной зоне при сварке чугуна, содержащего 2,5% кремния, в зависимости от температуры нагрева:

a — распределение температуры в поперечном сечении сварного соединения; *б* — диаграмма состояния; 1–5 — участки околошовной зоны с разной структурой; Ж — жидкость; А — аустенит; Ф — феррит; Г — графит; Ц — цементит; С — характерная точка диаграммы состояния сплава Fe–C–Si.

На четвертом участке при длительном пребывании металла в интервале температур от 500°C до A_1 формируются хлопьевидные выделения графита из цементита, а при больших скоростях охлаждения изменения незначительные.

Пятый участок соответствует исходной структуре основного металла.

Следовательно, на участке околошовной зоны, нагретом выше 850°C , при охлаждении могут образоваться закалочные структуры с большой твердостью и малой пластичностью, что определяет возникновение холодных трещин.

Металл шва в зависимости от скорости охлаждения и состава имеет структуру феррита или перлита с пластинчатым графитом (рис. 5.15). В зависимости от степени графитизации стойкость наплавленного металла против образования холодных трещин повышается, несмотря на то, что графитовые включения в металлической основе сплавов приводят к локальной концентрации напряжений.

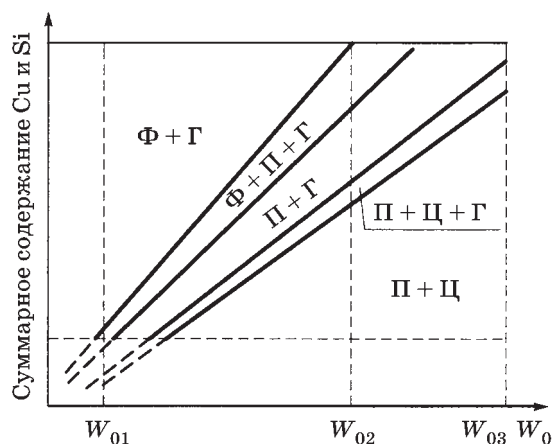


Рис. 5.15

Влияние скорости охлаждения и состава на структуру металла шва и околошовной зоны: $W_{01} < W_{02} < W_{03}$ — значения скорости охлаждения; Ф — феррит; Г — графит; П — перлит; Ц — цементит.

Таким образом, повышение пластичности чугунного шва и соединения в целом обеспечивается повышенным содержанием графита и подогревом.

Выбор способа сварки, состава наплавленного металла шва и температуры подогрева зависит от назначения изделий, его последующей механической обработки и условий эксплуатации.

Состав шва может быть идентичен составу основного металла или отличный по составу, но имеющий близкие к основному металлу механические и эксплуатационные свойства. Возможно получение наплавленного металла другого состава в местах, не определяющих обрабатываемость изделия и его эксплуатационные свойства (заварка мелких дефектов).

Температуру подогрева выбирают, учитывая требования к структуре шва и околошовной зоны. Для обеспечения процесса графитизации в шве и околошовной зоне применяют предварительный и сопутствующий подогрев до температур 650...700°C или 350...400°C. При использовании сварочных материалов, обеспечивающих получение пластичного металла шва, предварительный подогрев можно исключить или снизить его температуру до 150...200°C.

В зависимости от температуры подогрева различают сварку с подогревом (горячую) и без подогрева (холодную).

5.4.2. ГОРЯЧАЯ СВАРКА ЧУГУНОВ

Горячая сварка может быть с низким (до температур 350...400°C) и высоким подогревом (до 650...700°C). Наилучшие свойства сварных соединений со структурой серого чугуна в шве (отсутствие хрупких структур и трещин, высокие прочностные характеристики) получают при горячей сварке с высоким подогревом изделия и небольших скоростях охлаждения (50...100°C/ч), при которых не происходит отбеливание чугуна как в шве, так и в околошовной зоне.

Технология горячей сварки включает в себя следующие операции: подготовку под сварку, предварительный подогрев, сварку, последующее медленное охлаждение изделий. При горячей сварке чугуна используют ручную дуговую и механизированную сварку сплошной и порошковой проволокой.

Ручная дуговая сварка. Сварку выполняют плавящимися покрытыми или угольными электродами.

Плавящиеся электроды изготавливают из чугуновых стержней с обмазкой из стабилизаторов горения дуги и компонентов, содержащих кремний (FeSi). Для сварки плавящимися электродами используют чугуновые электроды, которые состоят из чугунового стержня, содержащего 3...3,5% углерода, 3...4% кремния, 0,5...0,8% марганца, и стабилизирующего покрытия с добавкой графитизаторов.

При дуговой заварке дефектов литья в изделиях из ковких чугунов, чугунов с шаровидным графитом или других специальных чугунов состав стержней в электродах обычно такой же, как у основного металла. Сварку ведут на постоянном токе обратной полярности или на переменном токе при повышенных токах $I_{\text{св}} = (60 - 100)d_{\text{э}}$, с использованием специальных электрододержателей. Используют электроды диаметром до 12 мм. Скорость охлаждения после сварки — не выше 50°C/ч.

Наплавленный металл в виде перлитно-ферритной структуры обеспечивает сварка электродами со стальным стержнем из проволоки Св-08 и обмазкой из графита и компонентов, содержащих кремний. Температура подогрева в зависимости от марки чугуна и объемов свариваемой детали составляет 300...700°C. Последующее охлаждение должно быть со скоростью до 100°C/ч. Основным недостатком этих электродов — неравномерность состава металла и структуры по длине шва и вероятность образования ледебурита в первом слое металла шва и зоне сплавления.

Неплавящимся электродом сварку проводят с использованием графитовых стержней диаметром 8–20 мм, присадочных чугуновых прутков и флюса на основе буры.

Ручную дуговую сварку чугуна выполняют участками длиной 30...60 мм с послойным охлаждением на воздухе до температуры 60°C и после сварки шов проковывают.

Механизированная сварка порошковыми проволоками. Выполняется с защитой (CO₂) или без дополнительной защиты на постоянном токе соответственно обратной или прямой полярности. Используют проволоки диаметром до 5 мм, содержащие железный порошок, графит и кремний в кремнийсодержащих компонентах, а также легирующие элементы (4,5...5% C; 4,0...5,3% Si; 0,1...0,3% Al; 0,1...0,3% Ti). Температура подогрева должна быть в пределах 600...700°C.

При малых объемах сварочной ванны сварку порошковыми проволоками выполняют в CO₂, а при заварке крупных дефектов литья — без дополнительной защиты. Сварку ведут при повышенном вылете электрода (до 40...50 мм) на токах от 700 до 1400 А при скорости подачи 230...300 м/ч в зависимости от диаметра проволоки. При заварке крупных дефектов площадь сварочной ванны может составлять от 30 до 150 см² и процесс выполняют несколько сварщиков одновременно.

Недостатком горячей сварки чугуна являются усложнение технологии, связанной с подогревом, и тяжелые условия работы сварщика.

Электрошлаковая сварка. Сварка выполняется электродами в виде пластин или стержней, близких по составу к основному металлу. Возможно применение графитовых стержней с дополнительной присадкой в виде стружки или прутков из чугуна.

При малых толщинах сварку ведут без дополнительного подогрева. При большой толщине нужен местный предварительный подогрев, чтобы не получить закалочные структуры в околошовной зоне.

5.4.3. ХОЛОДНАЯ СВАРКА ЧУГУНОВ

При холодной сварке чугуна требуются специальные меры, чтобы в сварном соединении не возникали трещины и хрупкие зоны. Поэтому применяют электроды с повышенным содержанием графитизаторов (C, Si), а также модификаторов, чтобы получить металл шва отличный по составу, но имеющий близкие к основному металлу механические и эксплуатационные свойства, или получить наплавленный металл другого состава в местах, не определяющих обрабатываемость изделия и его эксплуатационные свойства (заварка мелких дефектов).

Ручная дуговая сварка серого и ковкого чугунов. Сварку выполняют электродами со стержнями из следующих материалов:

- сплавов на основе железа, легированных V, Nb, Ti (до 10%) и связывающих углерод в карбиды, распределенные в низкоуглеродистой матрице;
- сплавов на медной основе, не растворяющих углерод и не образующих стойких карбидов;
- сплавов на никелевой основе, растворяющих углерод без образования карбидов.

Стальные электроды на базе проволоки Св-08 или Св-08А с покрытием, содержащим 66% феррованадия, применяют для заварки поверхностных дефектов отливок и при ремонте ответственных чугунных изделий небольших размеров с малыми объемами наплавки. Ванадий обеспечивает образование карбидов, распределенных в пластичной матрице. Перед сваркой этими электродами рекомендуют местный подогрев до температуры 300°C.

Для сварки изделий из чугуна с шаровидным графитом и серого чугуна с пластинчатым графитом лучшими характеристиками обладают электроды, стержень которых изготовлен из проволоки, легированной ванадием (C — 0,2%, Mn — 0,8%, Si — 14%, V — 8...11%, S и P не более 0,04%). В составе покрытия электродов также есть карбидообразующие элементы (V, Nb, Ti), с помощью которых удастся связывать полностью весь углерод и получать структуру шва с ферритной матрицей и распределенными мелкодисперсными карбидами. Прочность металла шва, выполненного этими электродами, превосходит прочность серого чугуна.

Для сварки ответственных изделий из серого чугуна можно применять обычные электроды для сварки сталей с обмазкой основного типа. Сварка такими электродами выполняется на постоянном токе обратной полярности. Стальные электроды такого типа применяют также при специальных способах

получения прочного соединения, например, при сварке со стальными шпильками, которые предварительно ввертывают в кромки детали и затем заваривают.

Электроды из цветных металлов применяют, чтобы при низкой температуре подогрева или без него получить пластичный металл шва, не подвергающийся закалке. При этом происходит частичная релаксация возникающих напряжений и уменьшается опасность хрупкого разрушения в околошовной зоне. При сварке должны обеспечивать минимальное расплавление основного металла, чтобы исключить переход в металл шва большого количества углерода.

Медными электродами сваривают малогабаритные изделия с небольшими дефектами, работающие при незначительных статических нагрузках и требующие плотных швов. Медь не образует карбидов и не растворяет углерод. Электроды состава 80% Cu и 20% Fe дают достаточно прочное сварное соединение, которое хорошо обрабатывается. Стержень электрода изготавливают из медной проволоки, а покрытие содержит ферромарганец, карбид кремния, мрамор, плавиковый шпат и маршаллит, и большое количество железного порошка. Такие электроды предназначены для дуговой сварки без подогрева изделий из серого и ковкого чугуна при ремонте тонкостенных конструкций.

Железомедные, железоникелевые и медно-никелевые электроды делают составными — стержень из цветного металла, а железо входит в состав электрода в виде оплетки, дополнительного стержня или порошка в покрытии. Содержание железа в металле шва обычно не должно превышать 10...15%. Сварку ведут с минимальным тепловложением для того, чтобы уменьшить зону нагрева, в которой возможно образование закалочных структур и высоких остаточных напряжений. Применяют электроды малых диаметров 3–4 мм, малую силу тока $I_{св} = (20...30)d$, сварку осуществляют короткими участками (15–25 мм) и после сварки проводят проковку шва.

Электроды со стержнем из сплавов никеля также дают хорошие результаты при сварке чугуна. Для электродов используют чистый никель, сплав никеля с железом (30–50% Fe) и сплав никеля с медью 20–30%. К этому классу относятся никелемедные и никележелезные электроды, наплавленный металл которых не образует соединений с углеродом и не растворяет углерод, уменьшает отбеливание и способствует графитизации.

Для сварки, наплавки и заварки дефектов литья в деталях из серых и высокопрочных чугунов применяются электроды, стержень которых изготавливают из проволоки типа Св-08Н50, что обеспечивает в составе наплавленного металла содержание 48% Ni, 2% Si, Mn. Для сварки этих материалов при повышенных требованиях к чистоте обрабатываемой поверхности и воздействию ударных нагрузок используют электроды со стержнем из никелевой проволоки.

Электроды со стержнем из никелевого аустенитного чугуна с содержанием никеля более 20% (2,5% C, 2,5% Si, 0,6% Mn, 20% Ni, 5% Cu, 0,06% S, 0,2% P) также позволяют выполнять сварку чугуна без подогрева. Покрытие электрода состоит из 70% карборунда и 30% углекислого бария или стронция, разведенных на жидком стекле. В сварном шве образуется никелевый аустенит, растворяющий большое количество углерода без образования карбидов, что обеспечивает высокую пластичность. Сварку электродами выполняют как на переменном, так и постоянном токе и применяют для исправления дефектов

в отливках, где механическая обработка наплавленного металла затруднительна, а сварное соединение должно иметь высокую прочность.

Механизированная сварка (холодная). Сварку чугуна в CO_2 выполняют обычными проволоками типа Св-09Г2СА диаметром до 1 мм, на малых токах для обеспечения минимального расплавления основного металла.

Применяют также сварку порошковыми проволоками с большим содержанием никеля без защиты или в CO_2 . Эти проволоки обеспечивают получение металла шва с аустенитной матрицей и включениями графита. Основная задача при выборе режимов — обеспечить минимальную ширину околошовной зоны. Возможна сварка без последующей термической обработки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие основные структуры образуются в железе с изменением температуры?
2. Какие существуют четыре основных превращения в сталях?
3. Чем определяется допустимая скорость охлаждения при сварке?
4. Какие электроды, проволоки, газы и флюсы рекомендуют для сварки низкоуглеродистых сталей?
5. В чем заключается основное требование при выборе сварочных материалов для теплоустойчивых сталей?
6. Какие электродные материалы позволяют исключить последующую термообработку при сварке закаливающихся сталей?
7. Как влияют теплофизические свойства высоколегированных сталей на особенности их сварки?
8. Какие структурные превращения характерны для высокохромистых сталей?
9. Какие две схемы технологического процесса используют при сварке высокохромистых сталей?
10. Какие структурные превращения характерны для хромоникелевых сталей?
11. Какие технологические приемы используют для предупреждения образования трещин при сварке хромоникелевых сталей?
12. В чем основное отличие структуры чугуна от структуры стали?
13. В чем основные особенности «горячей» сварки чугуна?
14. Какие сварочные материалы используют при «холодной» сварке чугуна?

6.1. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цветные металлы существенно отличаются от сталей теплопроводностью, химической активностью, температурами плавления. По совокупности этих характеристик цветные металлы можно условно разделить на следующие группы: легкие (алюминий, магний, бериллий); химически активные и тугоплавкие (титан, цирконий, ниобий, тантал, молибден); тяжелые и драгоценные (медь, золото, платина и др).

Алюминий и алюминиевые сплавы. Эти сплавы обладают малой плотностью ($2,7 \text{ г/см}^3$), хладостойкостью, коррозионной стойкостью в окислительных средах и низкой температурой плавления (температура плавления чистого алюминия 660°C), высокой тепло- и электропроводностью, повышенным по сравнению со сталью коэффициентом линейного расширения и низким модулем упругости.

Алюминий — это металл без полиморфизма с ГЦК решеткой. Основные примеси — железо и кремний. Поэтому по границам зерен возможно выпадение кристаллического Si и образование фаз (Al-Fe-Si) и Al_3Fe .

Основные сплавы алюминия получают при легировании марганцем до 1,5% (АМц), магнием до 6% (АМг), медью до 6% (сплавы серии Д), а также Si, Zn, Ni, Ti, V, Zr с различным процентным содержанием и разделяют на деформируемые, применяемые в пресованном, катаном и кованом состояниях, и литейные (рис. 6.1). Деформируемые

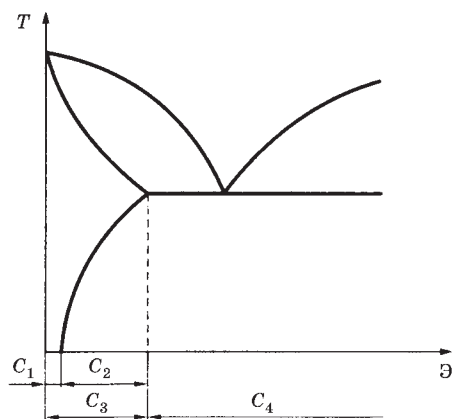


Рис. 6.1

Классификация алюминиевых сплавов по диаграмме состояния (схема):

C_1 — сплавы, не упрочняемые термической обработкой; C_2 — сплавы, упрочняемые термической обработкой; C_3 — деформируемые сплавы; C_4 — литейные сплавы; Э — концентрация легирующих элементов.

руемые алюминиевые сплавы в свою очередь подразделяются на сплавы не упрочняемые и сплавы, упрочняемые термической обработкой.

Упрочнение алюминиевых сплавов достигается легированием. Основной тип упрочнения — *дисперсионное твердение* (старение) — состоит в закалке на пересыщенный твердый раствор и последующем старении (искусственном или естественном) с выделением из твердого раствора упрочняющих дисперсных фаз. Образующиеся фазы имеют новую решетку, что вызывает искажения решетки матрицы и, следовательно, внутренние напряжения и обуславливает максимальную прочность.

Естественное старение происходит при вылеживании, когда температура соответствует температуре окружающей среды и избыточное количество легирующих элементов, зафиксированных закалкой, выделяется в виде фазы (например, CuAl_2) до равновесного содержания.

Искусственное старение — это выделение фазы при повышенных температурах, причем, чем выше температура, тем быстрее процесс и ниже получаемая прочность (рис. 6.2).

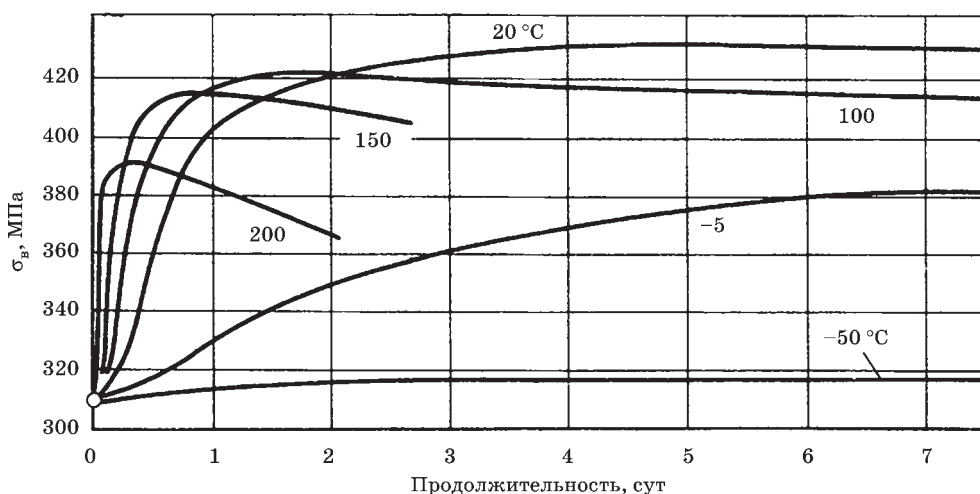


Рис. 6.2
Изменение прочности σ_b сплава Al-Cu в процессе выдержки при разных температурах

К деформируемым термически не упрочняемым относят алюминиевые сплавы серии АМг и АМц. Термически упрочняемые сплавы это сплавы серии Д (Al-Cu), а также сплавы серии АВ с тройным легированием (Al, Mg, Si) и серий АД и АК (Al-Mg-Cu-Si-Zn-Mn-Fe).

Большинство литейных сплавов, созданных на основе системы Al-Si (силумины), также упрочняются термической обработкой. Сварку силуминов обычно производят в случае ремонта или исправления дефектов литья.

Медь и медные сплавы. Эти материалы обладают высокой тепло- и электропроводностью, химической стойкостью и хладостойкостью и применяются для изготовления теплообменных аппаратов, трубопроводов и сосудов криогенной техники и электропроводящих устройств. Основными сплавами на основе меди являются латуни и бронзы.

Медь (М0, М1, М2 и др.) при обычных условиях достаточно инертна, но при нагревании реагирует с кислородом, водородом, серой и фосфором. С азотом практически не реагирует, что позволяет использовать азот в качестве защитного газа при сварке чистой меди.

Кислород в меди находится в виде закиси меди (Cu_2O), которая образует с медью эвтектику ($\text{Cu}-\text{Cu}_2\text{O}$) с температурой плавления 1065°C — несколько ниже температуры плавления меди. Эвтектика формируется по границам зерен меди, ухудшая механические и технологические свойства меди, и при нагреве оплавляется, охрупчивая металл.

Водород растворяется в меди, но его растворимость при кристаллизации изменяется почти в два раза сильнее, чем в железе. При сварке меди газ не успевает выделяться из металла сварочной ванны, образуя поры или концентрируясь в микронесплошностях, создает высокое давление, приводящее к зарождению трещин.

Серa хорошо растворяется в расплавленной меди и практически не растворима в твердой меди. При затвердевании образует эвтектику ($\text{Cu}-\text{Cu}_2\text{S}$) с температурой плавления 1067°C , которая может привести к образованию горячих трещин.

Латуни — это медноцинковые сплавы (Л60, Л80 и др.). Латуни, содержащие до 39% Zn, очень пластичны, хорошо свариваются и обладают коррозионной стойкостью. Практическое применение имеют латуни, содержащие до 50% Zn.

Эти латуни по своей структуре могут быть как однофазными (α или β -латуни), так и двухфазными ($\alpha + \beta$ -латуни). С увеличением содержания цинка в α -твердом растворе до 39%, повышается прочность латуни и снижаются пластичность, тепло- и электропроводность и коррозионная стойкость. При больших концентрациях Zn образуются интерметаллиды CuZn , CuZn_2 и др., ухудшающие пластические свойства латуни.

Специальные латуни, кроме Zn, содержат Fe, Al, Si, Ni и другие компоненты (ЛА77-2, ЛАЖ60-1-1, ЛН65-5 и т. д.). Алюминий уменьшает летучесть цинка, образуя на поверхности расплавленной латуни защитную пленку из оксида алюминия. Железо задерживает рекристаллизацию латуней и измельчает зерно, повышая механические и технологические свойства сплава. Кремний улучшает свариваемость латуней (ЛК80-3).

Бронзы представляют собой сплавы Cu, в которых основными легирующими элементами являются Sn, Al, Mn, Si, Be, Fe при содержании Zn не более 5%. Название бронзы дается по основному легирующему элементу. Бронзы делятся на две большие группы: оловянные бронзы (БрО8,0-0,3, БрОФ7-0,2, БрОЦС4-4-4 и др.) и безоловянные бронзы, не содержащие олова (БрА5, БрАЖМц10-3-1,5, БрКМц3-1 и др.).

Сплавы меди с никелем используют для повышения механических свойств и коррозионной стойкости конструкций. К этим сплавам относятся мельхиор (МНЖМц30-1-1), а также сплавы МНЮ и МНЖ5-1, применяемые для изготовления сварных изделий, работающих в агрессивных средах, особенно в морской воде. Сплавы на тройной основе медь–никель–цинк типа нейзильбер содержат 5...35% никеля и 13...45% цинка. Наибольшее распространение получил

сплав, содержащий 15% никеля и 20% цинка (МНЦ15-20). Он представляет собой тройной твердый раствор никеля и цинка в меди. Нейзильбер обладает высокой коррозионной стойкостью на воздухе, в растворах солей и органических кислот и удовлетворительно сваривается. Для изготовления сварных изделий используют листы, ленты, прутки, трубы и др.

Титан и сплавы на его основе. Эти сплавы имеют высокую коррозионную стойкость во многих агрессивных средах и прочность вплоть до температур 450...550°C и применяются в химическом машиностроении, судостроении, авиационной и других отраслях промышленности.

Титан обладает полиморфизмом и имеет высокотемпературную модификацию β -Ti с объемно-центрированной кубической решеткой и низкотемпературную — α -Ti с гексагональной плотноупакованной решеткой. Температура полиморфного превращения титана $\alpha \leftrightarrow \beta$ в равновесных условиях равна 882,5°C. Примеси внедрения — кислород, азот, водород и углерод снижают его пластичность и вязкость, поэтому их количество ограничивают.

Сплавы титана содержат легирующие добавки, которые повышают прочностные характеристики титановых сплавов и влияют на его фазовый состав.

По влиянию на температуру превращения и стабилизацию фазы легирующие элементы делят на α -стабилизаторы, β -стабилизаторы и нейтральные упрочнители (Zr, Hf, Sn), мало влияющие на температуру полиморфного превращения (рис. 6.3).

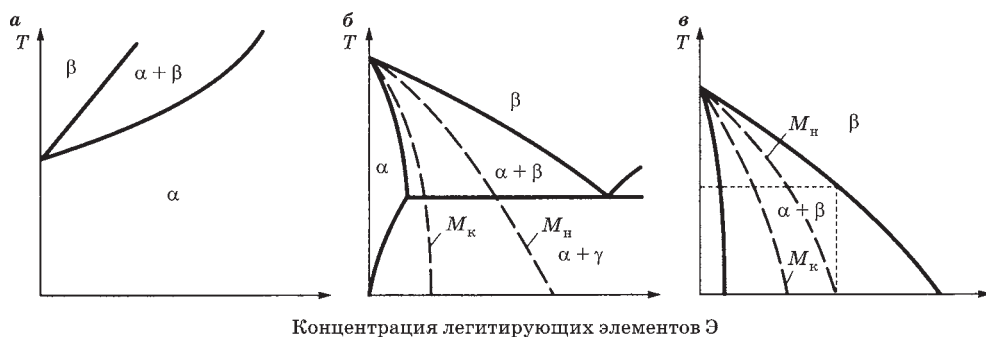


Рис. 6.3

Влияние α -стабилизаторов (а), эвтектоидообразующих (б) и изоморфных (в) β -стабилизаторов на температуру полиморфного превращения титана (схемы диаграмм состояния)

Такие элементы как Al являются α -стабилизаторами и расширяют область существования низкотемпературной кристаллической модификации титана, повышая температуру $\alpha \rightarrow \beta$ — превращения (рис. 6.3а).

Добавки в титан Mn, Cr, Mo, V и других легирующих элементов позволяют сохранить при комнатной температуре высокотемпературную β -фазу, т. е. являются β -стабилизаторами. В числе β -стабилизаторов имеются элементы эвтектоидообразующие, обладающие большей, но ограниченной растворимостью в β -фазе, чем в α -фазе (рис. 6.3б) и изоморфные (рис. 6.3в), неограниченно растворяющиеся в β -фазе (V, Nb, Ta, Mo, W).

Вследствие эвтектоидного превращения β -фаза распадается на α - и γ -фазы. При определенных концентрациях и температурных условиях эвтектоидообразующие β -стабилизаторы могут образовать с титаном интерметаллидные соединения. По возрастающей интенсивности стабилизации β -фазы эти элементы можно расположить в следующем порядке: Fe, Mn, Cr, Mo, V, Nb, Ta.

Изменяя количество этих элементов в титане, можно получить однофазные α -сплавы, двухфазные ($\alpha + \beta$)-сплавы или даже однофазные β -сплавы.

Технический титан и однофазные α -сплавы не упрочняются при термообработке. Двухфазные ($\alpha + \beta$)-сплавы и однофазные метастабильные β -сплавы после термообработки (закалки и старения) могут иметь прочность до 1400 МПа.

6.2. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Высокое сродство Al к кислороду приводит к образованию на его поверхности тугоплавкой оксидной пленки (Al_2O_3), которая относится к группе плотных пленок и предохраняет металл от дальнейшего окисления. На поверхности двойных сплавов алюминия с медью, марганцем, кремнием, железом, цинком также образуется оксидная пленка, по структуре аналогичная пленке на чистом алюминии.

Наличие на поверхности металла тугоплавкой пленки Al_2O_3 ($T_{\text{пл}} = 2050^\circ\text{C}$) с высоким электросопротивлением отрицательно влияет на процесс сварки. Оксидная пленка не плавится, не растворяется в жидком металле сварочной ванны и активно адсорбирует влагу, которая при нагреве диссоциирует с выделением водорода, образующего поры в сварных швах.

При сварке алюминиевых сплавов встречаются различные дефекты: включения оксидных пленок и вольфрама, прожоги, коробления и смещение кромок, газовая пористость и трещины.

Включения оксидной пленки в шве устраняют путем ее разрушения за счет катодного распыления при сварке в среде аргона, высокой концентрации теплоты при сварке в гелии или воздействия составляющих флюса и покрытия электрода, которые разрыхляют пленку, смывают и уносят в шлаки. Этому процессу способствуют газы, образующиеся при взаимодействии флюсов с жидким металлом. Однако в процессе сварки может быть разрушена лишь тонкая оксидная пленка. Толстые пленки необходимо удалять перед сваркой механической обработкой и травлением в специальных растворах.

Вольфрамовые включения в сварном соединении можно уменьшить при применении вольфрамовых электродов с оксидом лантана или оксидом иттрия, которые более долговечны в эксплуатации за счет высокой эмиссионной способности. Следует избегать коротких замыканий электрода при сварке, обеспечивать хорошую защиту W от воздействия окружающего воздуха и регламентировать время непрерывного горения дуги для уменьшения перегрева W -электрода.

Прожоги образуются в связи с высокой жидкотекучестью алюминия и низкой прочностью при высоких температурах (рис. 6.4а). Для их предотвращения при однослойной сварке или сварке первых слоев многопроходных швов с большой погонной энергией необходимо применять формирующие подкладки из графита или стали.

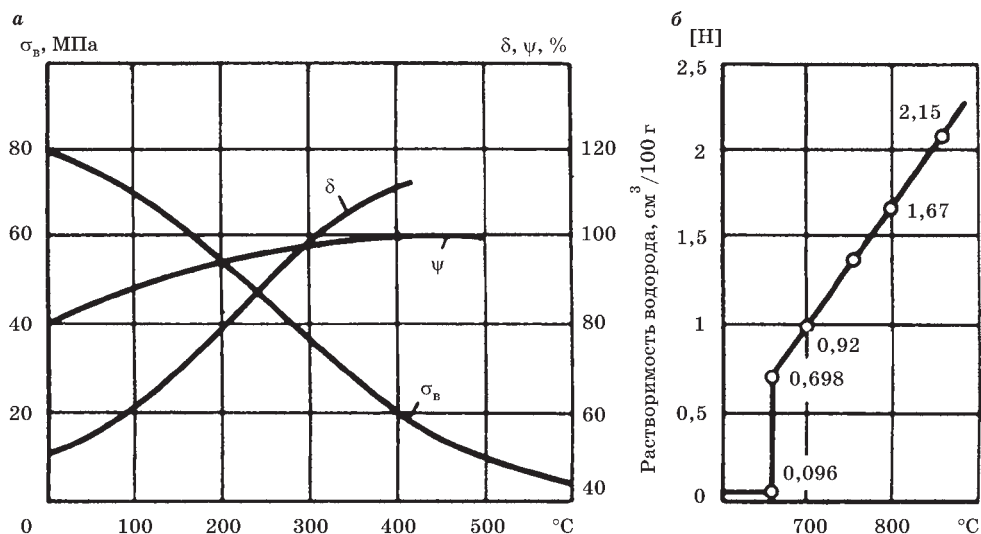


Рис. 6.4
Изменение прочности и пластичности (а) и растворимости водорода (б)
в алюминии в зависимости от температуры нагрева

Коробление конструкций вызвано высокой теплопроводностью, большой величиной коэффициента линейного расширения и низким модулем упругости сплавов алюминия. Поэтому при сварке необходимо жесткое закрепление кромок деталей пневматическими или гидравлическими прижимами на специальных стендах, которые следует изготавливать из сталей с низкой теплопроводностью.

Пористость — один из основных видов дефектов, вызванный в первую очередь водородом. Основными источниками появления водорода является влажность защитной среды и присутствие газов и влаги на поверхности свариваемого материала и сварочной проволоки. В твердом алюминии водород практически нерастворим (рис. 6.4б). Растворимость водорода наблюдается лишь при нагреве выше 660°C, снижается при введении в алюминий Cu, Si и Sn и растет при легировании Mn, Ni, Mg, Fe и Cr.

Уменьшение пористости достигают при обработке поверхности кромок (химическое травление, шабрение) и проволоки (химическое травление, вакуумный отжиг, прогрев в аргоне при $T = 250...300^\circ\text{C}$). Длительность хранения перед сваркой основного металла после обработки должна быть не более 3 ч, а сварочной проволоки — не более 8 ч.

Скорость всплывания газовых пузырей должна превышать скорость кристаллизации, поэтому необходимы предварительный и сопутствующий подогрев до температуры 150...250°C, увеличение погонной энергии сварки, применение двухдуговой или трехфазной сварки. Эффективно также увеличение диаметра сварочной проволоки с 1,5 до 3 мм, сокращение числа проходов при выполнении шва, тепловое и механическое воздействие на жидкий металл сварочной ванны при сварке (магнитное перемешивание и др.).

В сборочно-сварочных цехах необходимо обеспечивать влажность воздуха не более 85%, температуру 18...20°C и не допускать выполнение работ, связанных с интенсивным образованием пыли и дыма (запыленность по IV классу чистоты).

Кристаллизационные трещины наблюдаются при сварке сплавов систем Al–Mg, Al–Cu, Al–Zn и Al–Si.

Металлургические способы уменьшения склонности к трещинам предусматривают легирование элементами, которые изменяют пластичность металла в твердо-жидком состоянии, уменьшают ширину эффективного интервала кристаллизации или повышают температуру реального солидуса сплавов.

Уменьшение жесткости стыкуемых деталей также влияет на образования горячих трещин. При сварке деталей разной толщины необходимо предусматривать полку со стороны точеных деталей (фланец, шпангоут и др.), длина которой должна составлять $2s$ (s — максимальная толщина стыкуемых деталей в зоне сварки), но не менее 30 мм. При сварке врезных фланцев, цилиндрических и сферических деталей толщиной до 2 мм диаметр шва должен быть не менее 60 мм, а при толщине до 6 мм — не менее 120 мм.

Для уменьшения жесткости свариваемых деталей из тонколистового материала ($s < 2$ мм) рекомендуется загибка заготовок.

При изготовлении изделий со швами различной протяженности рекомендуется в первую очередь выполнять швы большой протяженности и швы максимального сечения, а затем короткие швы с малым сечением.

Следует избегать соединений по отбортовке на сплавах с $\sigma_b > 250$ МПа, которые в районе сгиба имеют микронадрывы, являющиеся очагом образования трещин, а также соединений «по кромке», так как в них возможно появление трещин в корне шва из-за несплавлений, вызванных наличием оксидной пленки на поверхности металла.

Трещины при сварке можно наблюдать и в зоне термического влияния, если шероховатость поверхностей свариваемых элементов составляет > 40 мкм.

При сварке термоупрочняемых сплавов металл под действием термического цикла разупрочняется в зоне термического влияния. Прочность сварного соединения в этой зоне составляет 60–70% прочности основного металла, поэтому после сварки целесообразно осуществить термообработку (закалку и искусственное старение) для восстановления исходных свойств металла.

Ручная и механизированная дуговая сварка в среде инертных газов. Сварку выполняют неплавящимся (вольфрамовым) и плавящимся электродом в аргоне, гелии повышенной чистоты и смесях аргона с гелием.

Сварка вольфрамовым электродом диаметром 2...6 мм целесообразна для металла толщиной до 15 мм. Присадочный металл выбирают в зависимости от марки сплава: для технического алюминия — проволоку типа АО, АД или АК; для сплавов типа АМг — проволоку того же состава, но с увеличенным (на 1...1,5%) содержанием магния для компенсации его угара. Диаметр присадочных проволок — 2...5 мм.

Ручную аргонодуговую сварку вольфрамовым электродом ведут на переменном токе при расходе аргона 6...15 дм³/мин. Сварку можно выполнять не только в аргоне, но и в гелии при расходе гелия в 1,8...2,2 раза выше, чем

аргона. Напряжение дуги при сварке в аргоне 15...20 В, при сварке в гелии 25...30 В. Сила тока зависит от толщины металла и диаметра электрода и выбирается в пределах 50...360 А при сварке в аргоне и 30...300 А при сварке в гелии.

При толщине листов до 3 мм сварку можно вести за один проход на подкладках, которые одновременно служат и для защиты обратной стороны шва. С этой точки зрения нахлесточные, угловые и тавровые соединения менее технологичны.

Металл толщиной 4...6 мм можно сваривать без скоса кромок за два прохода с двух сторон.

При толщине металла свыше 6 мм необходима V-образная разделка и увеличение числа проходов. Возможна также X-образная разделка кромок.

Сварку вольфрамовым электродом легко механизировать. Производительность сварки вольфрамовым электродом можно повысить в 3...5 раз, если использовать трехфазную дугу.

Сварка плавящимся электродом в чистом аргоне либо в смеси из аргона и гелия (до 70% He) проволокой диаметром 1,5...2,5 мм на постоянном токе обратной полярности применяется обычно для толщин более 10 мм.

Стыковые швы выполняют при силе тока 200...450 А и напряжении на дуге 22...26 В. Наиболее распространены V-образная и X-образная разделки кромок с углом раскрытия 70...90° либо U-образная с углом раскрытия 30° и притуплением до 6 мм. Такое раскрытие кромок необходимо для размещения в разделке наконечника горелки. Число проходов может составлять от 2 до 20 в зависимости от толщины свариваемых деталей, диаметра электродной проволоки и вида разделки.

Угловые швы сваривают проволокой диаметром 1,5...2 мм при силе сварочного тока 200–300 А, напряжении дуги 16...24 В, расходе аргона до 15 дм³/мин.

Скорость сварки определяется сечением шва и может достигать 30...40 м/ч, скорость подачи проволоки — до 400 м/ч.

При использовании газовой смеси из 30% Ar и 70% He за один проход (на подкладке) можно сваривать металл толщиной до 16 мм, за два прохода — до 30 мм, так как при этом составе смеси увеличиваются ширина и глубина проплавления.

Сварка плавящимся электродом по флюсу. Сварку выполняют с использованием фторидно-хлоридных флюсов. Флюсы обладают большой электропроводностью даже в нерасплавленном состоянии и шунтируют дугу, что нарушает стабильность процесса. Поэтому механизированную сварку обычно ведут по слою флюса, не погружая в него электрод, но имеются флюсы, при использовании которых дуга может гореть под слоем флюса.

Толщина и ширина слоя насыщаемого флюса зависят от толщины свариваемого металла (обычно 10...16 мм). Для алюминиево-магниевого сплава используют флюсы, не содержащие NaCl, так как в результате восстановления натрия усиливается пористость и снижается пластичность сварных швов.

Возможна сварка металла толщиной свыше 4,0 мм электродами диаметром 1,0...4,0 мм на постоянном токе обратной полярности при плотности тока 30...150 А/мм², напряжении дуги 27...42 В и скорости 12...25 м/ч. С обратной

стороны шва для предотвращения вытекания жидкого металла необходима стальная формирующая подкладка.

Благоприятные результаты дает двухдуговая сварка, так как увеличиваются размеры сварочной ванны и время пребывания металла в жидком состоянии, а следовательно, улучшается дегазация и уменьшается пористость.

Ручная дуговая сварка. Сварку покрытыми электродами на постоянном токе обратной полярности применяют при толщине металла свыше 4 мм. При сварке технически чистого алюминия и сплавов типа АМц металлический стержень электрода изготавливают из проволок состава, близкого к составу основного металла. Для сплавов типа АМг следует применять проволоку с повышенным содержанием магния (1,5...2%) для компенсации его угара при сварке. Основу покрытия электродов составляют криолит, хлористые и фтористые соли натрия и калия.

При сварке алюминия толщиной свыше 10 мм необходима V-образная разделка кромок с углом раскрытия 60° и притуплением 1...2 мм и предварительный подогрев металла до температуры 100...400°С. Для электродов диаметром 4...8 мм, силу сварочного тока выбирают в пределах (45...60) d при напряжении на дуге 30...36 В.

Равнопрочность (при сохранении пластических характеристик) сварного соединения при сварке сплавов в нагартованном или термически обработанном состоянии обеспечивается утолщением кромок в зоне сварки. Другим методом повышения механических свойств сварных соединений является проковка, прокатка роликами шва в холодном или нагретом состоянии.

Прочность сварного соединения термически упрочняемых сплавов можно поднять до уровня основного металла последующей термообработкой сварного узла по циклу закалка и искусственное старение.

Электрошлаковая сварка. Для алюминия и алюминиевых сплавов толщиной 50...250 мм применяют электрошлаковую сварку на переменном токе пластинчатым электродом или плавящимся мундштуком под флюсами на основе хлористых солей щелочных и щелочноземельных металлов. Плотность тока в электроде обычно выбирают около 2,5 А/мм² при скорости сварки в пределах 6...8 м/ч. Шов формируют с помощью медных водоохлаждаемых или графитовых кристаллизаторов.

6.3. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ МЕДИ И МЕДНЫХ СПЛАВОВ

Технология сварки меди и ее сплавов определяется теплофизическими и химическими свойствами этих металлов. Для реализации процесса сварки в связи с большой тепло- и температуропроводностью меди требуется применение повышенной погонной энергии или предварительного подогрева.

Значительный коэффициент линейного расширения вызывает необходимость жесткого закрепления кромок или сварки по прихваткам. При большой толщине металла следует изменять величину зазора в стыке по длине шва, чтобы избежать смыкания кромок в процессе сварки.

Большая теплопроводность меди определяет малое время существования сварочной ванны в жидком состоянии, ограничивает возможности

металлургической обработки расплава и обуславливает необходимость применения активных раскислителей.

Окисление меди при высоких температурах может вызвать образование горячих трещин. Закись меди Cu_2O , которая растворима в жидком металле и ограничено — в твердом, сосредотачиваясь по границам зерен в виде эвтектики $\text{Cu}-\text{Cu}_2\text{O}$, приводит к образованию горячих трещин в металле шва. Поэтому в сплавах меди, применяемых для ответственных конструкций, содержание кислорода должно быть менее 0,01%.

Наличие примесей также может усилить склонность сварных соединений к образованию горячих трещин и содержание этих примесей должно быть ограничено ($\text{Bi} < 0,002\%$; $\text{Pb} < 0,03\%$; $\text{Sb} < 0,005\%$; $\text{S} < 0,1\%$).

Разрушение тугоплавких окислов, образующих пленку на поверхности сварочной ванны, осуществляют с помощью флюсов на основе буры ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), которые способствуют химической очистке, переводя тугоплавкие окислы в легкоплавкие комплексные соединения.

При сварке алюминиевых бронз образуется тугоплавкий окисел Al_2O_3 , для разрушения которого применяют флюсы, состоящие из фторидов и хлоридов, щелочных и других металлов. Выгорание легирующих добавок из бронз может быть одной из причин пористости сварных швов.

При сварке латуней возможно испарение цинка (температура кипения 907°C , т. е. ниже температуры плавления меди), которое может привести к пористости металла шва. Введение Mn и Si в шов уменьшает испарение Zn .

Снижение прочности и пластичности меди (рис. 6.5а) в диапазоне температур $400\ldots 600^\circ\text{C}$ при высоком уровне временных деформаций и напряжений может вызвать образование трещин в шве и околошовной зоне.

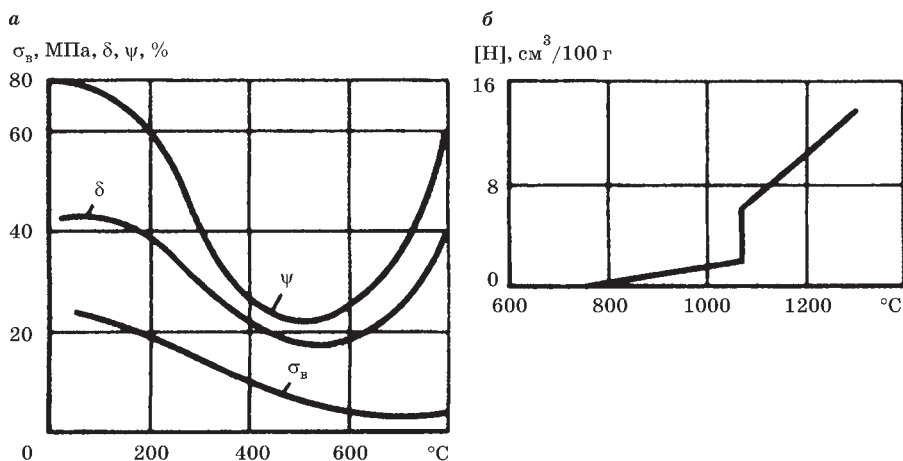


Рис. 6.5
Изменение прочности и пластичности (а) и растворимости водорода (б) в меди в зависимости от температуры нагрева

В расплавленном состоянии медь интенсивно поглощает водород (рис. 6.5б). При кристаллизации металла сварочной ванны растворимость его резко

снижается, но атомарный водород не успевает выделяться из расплава, что также приводит к образованию в шве пор и трещин. Водяные пары и углекислый газ, образующийся при взаимодействии окиси углерода с закисью меди, могут усилить пористость.

«Водородная болезнь» меди обусловлена высокими градиентами температур при сварке, которые способствуют развитию термической диффузии водорода в зоне термического влияния и сегрегации водорода вдоль линии сплавления. В околошовной зоне диффузионно-подвижный водород взаимодействует с Cu_2O , располагающейся по границам зерен. Образующиеся при этом пары воды не растворяются в меди и создают в металле значительные напряжения, приводящие к образованию большого числа микротрещин.

Повышенная жидкотекучесть расплавленной меди и ее сплавов затрудняет сварку в вертикальном и потолочном положениях, поэтому чаще всего сварку ведут в нижнем положении. Для формирования корня шва без дефектов необходимы подкладки из предварительно прокаленного графита или меди с водяным охлаждением.

Подготовка под сварку. Свариваемые кромки очищают от окислов и загрязнений механической обработкой. Очистку проволоки выполняют травлением в растворе азотной, серной и соляной кислот с последующей промывкой в щелочи и воде и сушкой горячим воздухом.

Разделка кромок зависит от толщины металла. При толщине металла до 5 мм соединения собирают без скоса кромок, при толщине 6...12 мм — с V-образной и при большей толщине — с X-образной разделкой и углом раскрытия 70...90° для неплавящегося электрода и 60...70° без притупления для плавящегося электрода.

Сварка в защитных газах. Сварку выполняют неплавящимся (вольфрамовым) и плавящимся электродами в среде инертных по отношению к меди газов: аргона, гелия, азота особой чистоты или газовых смесей типа 70...80% Ar и 20...30% N_2 для увеличения глубины проплавления. Это позволяет получать сварные соединения с наиболее высокими свойствами (механическими, коррозионными и т. д.), так как металл шва содержит минимальное количество примесей.

Сварку неплавящимся (вольфрамовым) электродом осуществляют на постоянном токе прямой полярности или переменном токе. Используют вольфрамовые лантанированные или иттрированные электроды диаметром до 6 мм. При сварке листов толщиной более 4...5 мм рекомендуется разделка кромок и подогрев до 300...400°C.

Присадочные проволоки из чистой меди М1 или М0 обеспечивают получение металла шва, по составу и физическим свойствам близкого к основному металлу, однако механические свойства сварного соединения понижены, наличие пористости уменьшает плотность металла шва. При введении в состав присадочных проволок раскислителей и легирующих компонентов (типа $\text{BrXO}_{0,7}$; BrXHT) механические свойства возрастают, но, как правило, снижается тепло- и электропроводность металла шва, что в ряде случаев недопустимо. Тогда применяют присадочные проволоки, микролегированные сильными раскислителями, которые не остаются в металле шва.

Сварку латуней и бронз наиболее часто выполняют вольфрамовым электродом, так как при сварке плавящимся электродом происходит более интенсивное испарение цинка и олова.

Выбор диаметра вольфрамового электрода и присадки определяется толщиной свариваемого металла. Сварочный ток зависит от диаметра электрода, рода тока и защитного газа и при аргонодуговой сварке устанавливается в пределах 120...400 А для электродов диаметром 2,5...4,5 мм. При сварке в среде азота сварочный ток выбирают на 10...15% меньше, чем при сварке в аргоне.

Сварка плавящимся электродом в инертных газах меди осуществляется проволокой диаметром 1...2 мм на постоянном токе обратной полярности.

Величину тока при сварке в аргоне устанавливают в пределах 150...200 А для проволоки диаметром 1 мм и 300...450 А для проволоки диаметром 2 мм при напряжении дуги 22...26 В.

При сварке в среде азота эффективный и термический КПД дугового разряда выше, чем в среде аргона и гелия. Глубина проплавления получается выше, но устойчивость дугового разряда в азоте ниже, чем в аргоне и гелии, поэтому при сварке в азоте или смеси азота с гелием силу тока уменьшают на 10...15%, а напряжение повышают на 15...20%.

Скорость сварки определяется сечением шва. Этот способ рекомендуют применять для листов толщиной более 8 мм с V- или X-образной разделкой кромок.

Плавящимся электродом небольшого диаметра (0,8...1,4 мм) можно сваривать и латуни. В связи с меньшей теплопроводностью этих сплавов, предварительный подогрев (до температур 100...150°C) требуется при толщине металла свыше 12 мм.

Несмотря на высокую чистоту защитных газов, в сварных швах может возникать пористость, что определяет необходимость применения легированных электродных проволок из бронзы (типа БрХ, БрХНТ, БрКМц) или медных проволок с добавками раскислителей. Для улучшения качества швов при сварке в азоте на поверхность подкладки наносят флюс на борной основе.

Ручная дуговая сварка. Для сварки меди толщиной 2...10 мм применяют электроды диаметром от 2 до 8 мм. Процесс выполняют на постоянном токе обратной полярности. Силу тока в зависимости от диаметра электрода выбирают в пределах 100...420 А при напряжении на дуге 25...30 В.

Медь толщиной до 4 мм сваривают без разделки кромок, до 10 мм — с односторонней разделкой, углом скоса кромок 60...70° и притуплении 1,5...3 мм. При большей толщине рекомендуется X-образная разделка. Листы толщиной до 4 мм сваривают без подогрева. При толщине 5...8 мм металл подогревают до 200...300°C, при толщине 24 мм — до 750...800°C.

Сварка покрытыми электродами позволяет получить швы с хорошими прочностными свойствами $\sigma = 176...196$ МПа. Необходимость легирования металла шва раскислителями ухудшает его теплофизические и электрические свойства (электропроводность шва составляет 20...25% электропроводности меди).

Для сварки латуней, бронз и медноникелевых сплавов применяют электроды с толстыми покрытиями и стержнем из меди марки М1 или М2 и бронзы типа БрКМц или БрХ.

Сварку ведут электродами диаметром 4...6 мм короткой дугой без поперечных колебаний на постоянном токе обратной полярности. Сила сварочного тока составляет (50...60) *d*.

Ручная дуговая сварка латуни применяется редко, так как интенсивное испарение Zn затрудняет работу сварщика. При сварке латуни применяют предварительный подогрев, пониженные токи и повышенные скорости.

Сварку бронз покрытыми электродами выполняют на постоянном токе обратной полярности как с подогревом, так и без предварительного подогрева, диаметр электродов — 6...8 мм, применяемые токи — 160...280 А.

Автоматическая сварка под флюсом. При изготовлении крупногабаритных сварных конструкций из меди технологический процесс достаточно прост и обеспечивает возможность получения высоких и стабильных механических свойств без предварительного подогрева. При использовании кремне-марганцевых кислых флюсов в металл шва переходят Si и Mn, в результате ухудшаются тепло- и электрофизические свойства соединений по сравнению с основным металлом. Применение бескислородных фторидных флюсов, которые содержат MgF_2 , NaF, BaF_2 , позволяет получать швы, удельное сопротивление которых в 1,5 раза ниже, а теплопроводность в 2 раза выше. Флюс, используемый для сварки, должен быть прокален при температуре 300...400°C.

Применение керамических флюсов позволяет раскислить металл шва и получить электро- и теплопроводность металла шва на уровне основного металла. С увеличением толщины металла керамические флюсы становятся ограниченно пригодными, так как не обеспечивают требуемой плотности и необходимой пластичности соединения.

Медь толщиной от 5 до 20 мм сваривают одним электродом без разделки кромок на токах 500...1100 А при напряжении на дуге 38...50 В и скорости сварки 8...40 м/ч. При большей толщине применяют U-образную разделку и одно- или двухдуговую сварку электродами диаметром 5...6 мм на токах 1000...1400 А при напряжении 45...55 В.

Для сварки *латуней* применяют плавленые бескислородные фторидные флюсы со сварочными проволоками диаметром 3...5 мм из меди марок М1, М2 или бронз типа БрКМц и БрОЦ, содержащими раскислители. При сварке медной проволокой состав металла шва и его свойства незначительно отличаются от свойств основного металла. Легирование металла шва раскислителями при сварке проволоками из бронз сильно снижает его тепло- и электропроводность.

Однопроходную сварку и первые слои при многопроходной сварке выполняют на подкладке из графита, охлаждаемой меди или флюсовой подушке. В связи с отсутствием предварительного подогрева начало шва располагают на выводной планке. При толщине листов до 6 мм применяют соединение без скоса кромок; при большей толщине — V-образную разделку с углом раскрытия 90° и притуплением 2...5 мм. Сборку стыка выполняют без зазора.

При использовании двухэлектродной сварки с расположением электродов поперек шва металл толщиной до 30 мм можно сваривать без разделки кромок. Сварку ведут на постоянном токе обратной полярности сварочной проволокой диаметром до 5 мм без предварительного подогрева кромок.

Бронзы достаточно хорошо свариваются под флюсом. Процесс, как и при сварке меди, ведут на постоянном токе обратной полярности.

Электрошлаковая сварка. Процесс применяют для соединения деталей больших толщин. Легирование шва осуществляют, применяя пластинчатые электроды соответствующего состава. Температура плавления флюса должна быть ниже температуры плавления меди. Применяют легкоплавкие флюсы системы NaF-LiF-CaF_2 , которые обеспечивают устойчивый процесс, подогрев и плавление кромок на требуемую глубину, хорошее формирование шва и легкое удаление шлаковой корки. Особенностью режимов электрошлаковой сварки меди являются повышенные сварочные токи до 800...1000 А и напряжение 40...50 В. Механические свойства металла шва мало отличаются от свойств основного металла.

6.4. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ

Свариваемость титана определяется его физическими свойствами. Высокая температура плавления титана (1668°C) и большая скрытая теплота плавления требуют больших затрат энергии для его расплавления.

Низкий коэффициент теплопроводности титана (в четыре раза меньше, чем у железа) обуславливает при сварке возникновение значительного градиента температур, что может привести к заметному росту напряжений.

Высокая химическая активность титана по отношению к газам вызывает при температурах выше 250°C активное поглощение водорода, а при нагреве выше температуры 350 и 550°C — энергичное взаимодействие с кислородом и азотом соответственно.

Водород, находящийся в пересыщенном твердом растворе, выделяется в виде гидридов титана (TiH_2), которые сильно охрупчивают титан и способствуют образованию холодных трещин по механизму замедленного разрушения. Кроме того, водород вызывает образование пор, поэтому допустимое содержание водорода ограничивают до 0,01% и принимают меры к его устранению.

Поверхностный слой титана, насыщенный кислородом и азотом, имеет высокую твердость и носит название альфированного слоя. Попадание частиц этого слоя в сварной шов снижает пластичность металла и перед сваркой его следует полностью удалять.

Таким образом, при сварке титана требуется тщательная защита не только расплавленного металла, но и участков, нагретых выше температуры 350°C. Защита считается надежной, если после сварки металл имеет блестящую поверхность.

Титан и его сплавы чувствительны к термическому циклу сварки. В высокотемпературном интервале существования β -фазы наблюдается интенсивный рост зерна. Этому способствует и низкая теплопроводность титана. При быстром охлаждении ($\alpha + \beta$)-сплавов возможно образование хрупких фаз типа мартенситных, снижающих пластические свойства соединений и способствующих образованию холодных трещин. Такие же фазы могут появиться при медленном охлаждении метастабильных β -сплавов. Поэтому главным критерием для выбора режимов сварки сплавов титана является скорость охлаждения при температуре полиморфного превращения.

Сварку α -сплавов следует проводить при минимальных погонных энергиях из соображений ограничения роста зерна; $(\alpha + \beta)$ -сплавы, где велика опасность образования хрупких промежуточных и мартенситоподобных фаз и интерметаллидных соединений, целесообразно сваривать на мягких режимах с малыми скоростями охлаждения; β -сплавы со стабильной или метастабильной структурой следует сваривать со скоростями охлаждения, близкими к закалочным (рис. 6.6).

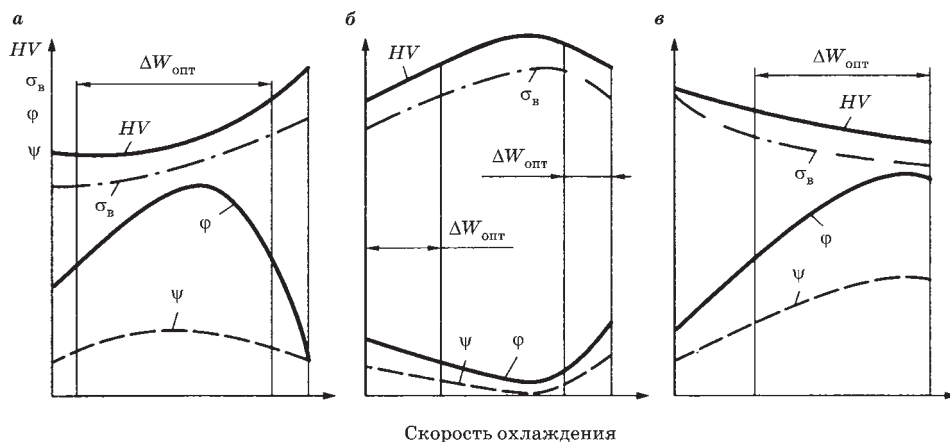


Рис. 6.6

Изменение механических свойств α - (а), $\alpha + \beta$ - (б) и β -сплавов (в) титана в околошовной зоне в зависимости от скорости охлаждения при сварке:

HV — твердость по Виккерсу; σ_B — предел прочности; ϕ — угол изгиба; ψ — относительное сужение; $\Delta W_{\text{опт}}$ — интервал скоростей охлаждения, обеспечивающих оптимальные механические свойства материала.

Сплавы со стабильной при различных температурах α - или β -структурой имеют высокую термическую стабильность, высокую прочность, пластичность, термообработкой не упрочняются и обладают хорошей свариваемостью.

Двухфазные сплавы, где β -фаза существует только при повышенных температурах, термообработкой не упрочняются, а сплавы, где β -фаза может сохраняться при охлаждении до комнатной температуры, являются термически упрочняемыми и, как правило, свариваются хуже однофазных.

В сплавах титана с неустойчивыми структурами может проходить старение с дополнительным образованием хрупких упрочняющих фаз и снижение пластических свойств соединений.

Для стабилизации механических свойств и снятия остаточных напряжений сварные соединения α -сплавов подвергают отжигу при 500...600°C, выдержка 0,5...1 ч.

Упрочняющая термообработка $(\alpha + \beta)$ - и β -метастабильных сплавов состоит в закалке с температур 880...950° и старении при 475...500° в течение 8...22 ч. Термообработку проводят в вакууме, в камерах с контролируемой атмосферой или герметичных оболочках.

Подготовка кромок. Для получения качественного сварного соединения подготовку кромок деталей из титана и его сплавов осуществляют механическим

путем. При использовании газокислородной или плазменной резки насыщенный газами слой удаляют механической обработкой на глубину более 1 мм. С кромок деталей, изготовленных ковкой, штамповкой и другими методами пластической деформации или подвергнутых термической обработке в печах без защитной атмосферы также удаляют поверхностный слой, насыщенный газами. Перед сваркой поверхности кромок и прилегающего основного металла, а также электродной проволоки очищают механическим путем или травлением. Кроме того, присадочный металл обычно подвергают вакуумному отжигу для удаления водорода, а кромки деталей обезжиривают органическим растворителем.

Разделка кромок при сварке титановых сплавов практически не отличается от разделок, применяемых при сварке сталей. В зависимости от толщины соединяемых деталей сварку выполняют без разделки, с V-, X-, U-образными разделками и замковыми соединениями.

Дуговая сварка в среде защитных газов. Титан и его сплавы сваривают неплавящимся лантанированным или иттрированным вольфрамовым электродом или плавящимся электродом в среде инертных газов или их смесей.

Качество сварных соединений определяется надежностью защиты зоны сварки и чистотой инертного газа. Для защиты зоны дуги и расплавленной ванны необходимо использовать аргон высшего сорта. Для защиты остывающей части шва и обратной стороны шва неответственных изделий допускается использовать аргон 2-го сорта. Гелий и его смеси с аргоном целесообразно использовать при дуговой сварке плавящимся электродом больших толщин (8...10 мм). При сварке в гелии расход газа, необходимый для защиты сварочной ванны, в 2...3 раза больше, напряжение на дуге в 1,4...1,6 раза выше, а ширина зоны расплавления в 1,4 раза больше, чем при сварке в аргоне. В связи с низкой теплопроводностью титана стыковые швы при сварке в аргоне имеют характерную конусообразную форму с малым коэффициентом формы шва. При сварке в гелии швы получают лучшей формы из-за более высокого напряжения дуги.

В связи с высокой химической активностью титана при повышенных температурах необходима надежная защита от атмосферы не только сварочной ванны и корня шва, но и остывающих участков сварного соединения, нагретых выше 250°C, когда начинается заметное взаимодействие титана с газами.

В зависимости от конфигурации и размеров свариваемых узлов применяют общую защиту узла в камере с контролируемой атмосферой, защиту сварного соединения с использованием местных камер и струйную защиту зоны сварки при подаче газа из сопла с удлиненной насадкой.

При общей защите изделие целиком размещают в камере, в которой создают вакуум (остаточное давление не выше 133 мПа), а затем заполняют ее инертным газом.

Для местной защиты только сварного соединения используют камеры с вакуумированием и без предварительного вакуумирования, когда для вытеснения воздуха и качественной защиты необходима продувка камеры 5...10-кратным объемом инертного газа.

Наибольшее распространение получила сварка специальными горелками с насадками, подкладками и другими приспособлениями с подачей защитного газа для защиты только зоны плавления и корня шва.

Сварку неплавящимся электродом выполняют непрерывно горячей или импульсной дугой в аргоне или гелии высокой чистоты. Для защиты зоны сварки используют удлиненные насадки на сопле горелки (длиной до 500 мм), подачу газа с обратной стороны через специальные подкладки, а также камеры с контролируемой атмосферой. Расход газа через сопло — 15...20 дм³/мин, в подкладку — 2,0...2,5 дм³/мин.

Листы небольшой толщины (до 4 мм) сваривают вольфрамовым электродом диаметром 1,6...3,0 мм на постоянном токе прямой полярности 50...200 А при скорости 30...50 м/ч на обычных установках для автоматической или ручной аргонодуговой сварки. Присадочный пруток диаметром 2,0...2,5 мм подают только при толщине металла более 1,5 мм. Без подачи присадочного прутка прочность соединения равна прочности основного металла. При подаче прутка его нагретая поверхность адсорбирует некоторое количество газов атмосферы, что приводит к снижению пластичности металла шва. Для металла толщиной до 2,5 мм целесообразно применять импульсную сварку без присадочной проволоки.

При толщине металла свыше 4 мм применяют разделку кромок V-, X- и U-образную. Для увеличения глубины проплавления при сварке вольфрамовым электродом на поверхность кромок наносят тонким слоем флюсы-пасты, которые позволяют без разделки кромок сваривать металл толщиной до 12 мм на меньших, чем обычно, сварочных токах. Эта технология снижает деформации сварных конструкций и уменьшает пористость швов, а также способствует частичному рафинированию металла шва.

При сварке вольфрамовым электродом погруженной дугой без разделки кромок также можно соединять листы повышенной толщины.

Плазменная сварка применяется для листов титана малой (0,025...0,5 мм) и средней (0,5...12,5 мм) толщины. Возможна многослойная плазменная сварка листов толщиной свыше 12 мм. По сравнению с обычной аргонодуговой, плазменная сварка обеспечивает более высокую производительность процесса и меньшие деформации конструкции.

Сварку плавящимся электродом в среде инертных газов применяют для стыковых, тавровых и нахлесточных соединений из металла толщиной более 4 мм в нижнем положении. Обычно сварку листов толщиной до 36 мм ведут без разделки кромок. Способы защиты и сварочная оснастка в основном те же, что и при сварке вольфрамовым электродом.

При сварке в аргоне наблюдается меньшее разбрызгивание металла и большая глубина проплавления, однако в гелии форма зоны проплавления более благоприятна: в аргоне швы относительно узкие, в гелии — более широкие. Лучшее формирование шва и стабильность процесса достигают при использовании смеси из 80% гелия и 20% аргона.

При сварке толщин от 4 до 36 мм используют проволоку диаметром 0,6...5 мм. Сварку следует производить при обратной полярности на режимах, гарантирующих струйный перенос металла. Силу тока в зависимости от диаметра проволоки выбирают в пределах 150...1200 А при напряжении 22...36 В в аргоне и 28...52 В в гелии. Расход аргона обычно составляет 20...60 дм³/мин, а гелия — 30...120 дм³/мин. Вылет плавящегося электрода должен быть

относительно небольшим из-за высокого электросопротивления титана и в зависимости от диаметра проволоки выбирается в пределах 10...55 мм.

При сварке стыковых соединений плавящимся электродом в два прохода (с двух сторон) можно сваривать металл без скоса кромок толщиной от 16 до 36 мм.

Для повышения производительности сварки применяют способ сварки титана по узкому зазору — щелевой разделке, выполняемый неплавящимся вольфрамовым или плавящимся электродом. В первом случае листы собирают с зазором 6...12 мм. Сварку ведут вольфрамовым электродом диаметром 3...4 мм с присадочной проволокой диаметром 1,5...2 мм при силе сварочного тока 200...300 А, расходе аргона 9...12 дм³/мин через горелку и 2...3 дм³/мин в подкладку с обратной стороны. При сварке плавящимся электродом используют проволоку диаметром 1,6...2 мм при том же расходе аргона, силе сварочного тока 360...420 А и напряжении 32...36 В.

Сварка под флюсом. Процесс сварки выполняют только при применении бескислородных флюсов, основные компоненты которых — фториды (CaF₂, NaF) и хлориды (BCl₂, NaCl). Для уменьшения опасности попадания водорода в металл шва флюс перед употреблением необходимо высушить при 200...300°C, чтобы содержание влаги во флюсе не превышало 0,05%.

Титан сваривают под флюсом на обычном оборудовании при постоянном токе обратной полярности. Защиту обратной стороны шва обеспечивают флюсомедной подкладкой или флюсовой подушкой. Высота слоя флюса на поверхности детали должна быть не меньше вылета электрода. Этот способ экономически эффективен при соединении металла толщиной 6...8 мм и более, но возможна сварка металла толщиной 2,0...4,5 мм.

Автоматическая сварка под флюсом осуществляется с использованием сварочной проволоки диаметром 2,5...5 мм. Применение проволок большего диаметра затруднено вследствие их повышенной жесткости. Для сварки технического титана и низколегированных сплавов используется сварочная проволока из технического титана. Для сварки средне- и высоколегированных сплавов применяют проволоки из легированных сплавов.

Сварку продольных и кольцевых швов на металле небольшой толщины (3...6 мм) рекомендуется выполнять на малых токах (200...350 А) проволоками диаметром 2...3 мм. При автоматической сварке под флюсом на токах более 600...700 А получение швов с удовлетворительным качеством формирования поверхности затруднено, поэтому для средних (8...15 мм) и больших толщин целесообразно применять сварку с двух сторон или многослойную сварку в разделку кромок на токах 300...450 А.

Электршлаковая сварка титана. Процесс экономически целесообразен для соединения заготовок (поковок) и деталей толщиной свыше 30 мм. Сварку производят электродными проволоками, плавящимся мундштуком и пластинчатым электродом. Расплавленный основной и присадочный металл защищают тугоплавкими фторидными флюсами и дополнительно — аргоном высшего сорта. Для защиты зоны плавления и остывающего металла осуществляют поддув аргона через специальные каналы в ползунах из расчета 5...12 дм³/мин для металла толщиной 30...120 мм.

Сварку производят переменным током с минимальной погонной энергией, обеспечивающей устойчивый электрошлаковый процесс и необходимое проплавление свариваемых кромок.

Электрошлаковая сварка проволочными электродами производится одной или двумя электродными проволоками. Этим способом можно сваривать металл толщиной 30...110 мм при использовании электродов диаметром 3...5 мм на токах 900...3000 А и напряжении 26...34 В. Применение электродной проволоки большего диаметра, чем при сварке сталей, связано с повышенной электропроводимостью флюсов и высоким удельным электросопротивлением титана, ограничивающим допустимую плотность тока в электродах.

Электрошлаковая сварка плавящимся мундштуком применяется для выполнения прямолинейных и криволинейных швов на металле большой толщины. Как и в случае сварки титана проволочным электродом, диаметры сварочных проволок и толщины плавящихся мундштуков должны быть больше, чем для сварки стали.

Электрошлаковая сварка пластинчатым электродом толщиной 8...18 мм при плотности тока 2,0...2,5 А/мм² и напряжении 13...17 В выполняется одной или несколькими пластинами, подключенными к одному источнику питания, и используется при сварке металла толщиной до 350 мм.

Прочность и пластичность сварных соединений при электрошлаковой сварке получают не ниже, чем у основного металла.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие основные свойства цветных металлов и сплавов влияют на свариваемость?
2. Какие основные способы сварки цветных металлов и сплавов?
3. В чем особенности подготовки кромок под сварку различных цветных металлов и сплавов?
4. Какие особенности технологии сварки в среде защитных газов сплавов алюминия?
5. Какие компоненты флюса необходимы при сварке сплавов алюминия?
6. В чем главные особенности технологии сварки меди и ее сплавов?
7. Какое влияние оказывает водород на качество сварных соединений меди и ее сплавов?
8. Какие дополнительные требования по защите возникают при сварке титана и его сплавов?
9. Какой главный критерий выбора режима сварки титана и его сплавов?
10. Какие основные способы сварки титана и его сплавов?

ГЛАВА 7 СВАРКА РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

7.1. СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ

Стали, которые имеют разную кристаллическую решетку (ГЦК, ОЦК) или отличаются по структуре (перлитные, ферритные, аустенитные), а также стали с однотипной решеткой, но с различной степенью легирования и составом легирующих элементов, в сварных соединениях называют *разнородными сталями*.

Конструкции, сваренные из разнородных сталей, называют *комбинированными* и применяют в тех случаях, когда условия работы отдельных частей конструкции отличаются температурой, агрессивностью среды или механическими воздействиями (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Классификация сталей, применяемых в сварных соединениях разнородных

Классы сталей и сварочных материалов	Группа стали	Характеристика сталей	Марки (примеры)
Перлитные и бейнитные	I	Низкоуглеродистые	Ст3, 20
	II	Низколегированные конструкционные	09Г2С, 10ХСНД, 20ХГСА
	III	Низколегированные среднеуглеродистые	30ХГСА, 40Х, 40ХН2МА, 38ХФ
	IV	Жаропрочные (Cr–Mo и Cr — Mo–V)	15ХМ, 12Х1МФ, 15Х1М1Ф
	V	Криогенные	ОН3, ОН6, ОН9
Мартенситные, ферритные, ферритно-мартенситные, аустенитно-мартенситные, ферритно-аустенитные	VI	12%-ные хромистые, коррозионностойкие	08Х13, 12Х13
	VII	Высокохромистые, жаростойкие	12Х17, 15Х25Т, 14Х17Н2
	VIII	12%-ные хромистые, жаропрочные	15Х11НМФ, 5Х12ВНМФ
	IX	Хромоникелевые коррозионностойкие	08Х21Н5Т
Аустенитно-ферритные и аустенитные стали и сплавы и сплавы на никелевой основе	X	Кислотостойкие и криогенные с δ -Fe	12Х18Н10Т, 10Х17Н13М3Т
	XI	Аустенитные жаропрочные	Х15Н35ВТ, 20Х25Н20С2
	XII	Аустенитные коррозионно-стойкие и криогенные	Х18Н20, Х13АГ19, 06Х23Н28М3Д3Т
	XIII	Жаропрочные никелевые сплавы	ХН67ВМТЮ, ХН70МФ

При сварке комбинированных сварных соединений в зависимости от свариваемости входящих в них материалов требуется применение специальных технологических приемов. Это обусловлено различным химическим составом сталей, разной температурой плавления и температурой фазовых и структурных превращений. При сварке происходит их смешивание в шве в зависимости от доли участия основного и присадочного металлов, что приводит к получению швов, которые отличаются от каждой из свариваемых сталей по химическому составу, структуре и механическим свойствам при нормальных и рабочих температурах.

При этом металл шва, особенно при многопроходной сварке, может не только отличаться по химическому составу и структуре от основного металла, но и иметь различный состав по сечению шва. Неоднородность химического состава сварного соединения вызывает концентрацию напряжений на участках с повышенной прочностью, что приводит к опасности возникновения локальных разрушений и ухудшению антикоррозионных свойств. Кроме того, эксплуатация при высоких температурах разнородных сварных соединений со структурной и химической неоднородностью обуславливает развитие неконтролируемых диффузионных процессов, что вызывает образование хрупких прослоек, понижение длительной прочности и коррозионной стойкости всего соединения.

Процессы в металле шва. Структуру металла шва при сварке разнородных сталей оценивают с помощью диаграммы Шеффлера (рис. 7.1) по эквивалентному содержанию хрома и никеля, определяемому по формулам

$$Ni = Ni + 30C + 0,5Mn + 30N,$$

$$Cr = Cr + Mo + 1,5Si + 0,5Nb + V,$$

где содержание элементов выражено в процентах.

При этом различна роль легирующих элементов, входящих в состав ванны. Элементы-ферритизаторы (Cr, Mo и др.) способствуют образованию структур с ОЦК решеткой, а аустенизаторы (C, Ni и др.) — с ГЦК решеткой.

Металл, имеющий однофазную аустенитную структуру (область А), склонен к образованию горячих трещин. Шов с аустенитно-ферритной структурой (область А + Ф) при повторных нагревах охрупчивается в результате превращения феррита в σ -фазу. Швы с ферритной структурой (область Ф) склонны к росту зерна при высоких температурах и к хрупкости при нормальных. В швах, имеющих мартенситную составляющую (области М, М+А, М+Ф, М+А+Ф), проявляется склонность к образованию холодных трещин.

Формирование структуры шва при сварке разнородных перлитных и аустенитных сталей начинается, когда первые слои кристаллизующегося металла образуются из расплавленного металла свариваемых деталей, перемешанного в ванне. В результате частичного перемешивания вблизи зоны сплавления со стороны перлитной стали образуется переходный участок в виде кристаллизационной прослойки с содержанием Cr — 3...12% и Ni — 2...7%, который имеет особую структуру высоколегированного мартенсита. Толщина прослоек изменяется от 0,05 до 0,6 мм в зависимости от скорости охлаждения и состава шва. Чем выше концентрация никеля в шве, тем вероятнее образование в шве

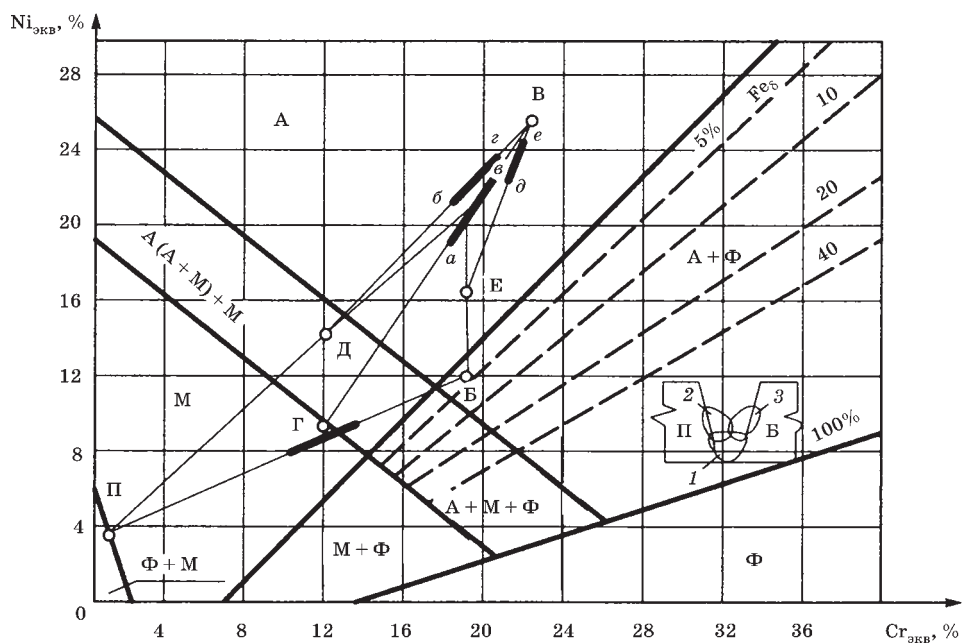


Рис. 7.1
Схема определения структуры в отдельных слоях (1...3)
многопроходного шва по диаграмме Шеффлера:

ав, бг, де — отрезки, описывающие структуру корня шва и состав слоев 2 и 3; Б, В, Г, Д, Е, П — точки, характеризующие исходные и расчетные структуры; А — аустенит; М — мартенсит; Ф — феррит; $Ni_{экв}$, $Cr_{экв}$ — эквивалентное содержание никеля и хрома.

аустенитной структуры с ГЦК решеткой и тоньше переходная прослойка от перлитной стали к аустенитной (рис. 7.2).

Основной объем затвердевшего металла шва имеет однородный состав, отличающийся от прослойки. Его конечную структуру в зависимости от состава свариваемых сталей можно определить по структурной диаграмме Шеффлера (см. рис. 7.1). Например, структура перлитной стали 12Х1МФ соответственно эквивалентным значениям хрома и никеля характеризуется точкой П, а аустенитная 08Х18Н10Т — точкой Б. С учетом их расплавления в соотношении 0,40/0,60 металл шва будет иметь структуру мартенсита или аустенитно-мартенситную (точка Г).

Структуру шва можно регулировать, применяя плавящийся электрод или присадки из сталей другого состава или изменяя разделку кромок, что позволяет влиять на доли участия свариваемых сталей в металле шва. Возможна также предварительная наплавка кромок электродами с заданным составом наплавленного металла.

После кристаллизации шва в твердой фазе протекают диффузионные процессы, в которых главное значение имеет скорость диффузии отдельных элементов в ГЦК и ОЦК решетке. При всех температурах диффузионная подвижность углерода в α -Fe заметно выше, чем в более плотно упакованной решетке γ -Fe (коэффициент диффузии углерода в α -Fe выше, чем в γ -Fe, при 500°C

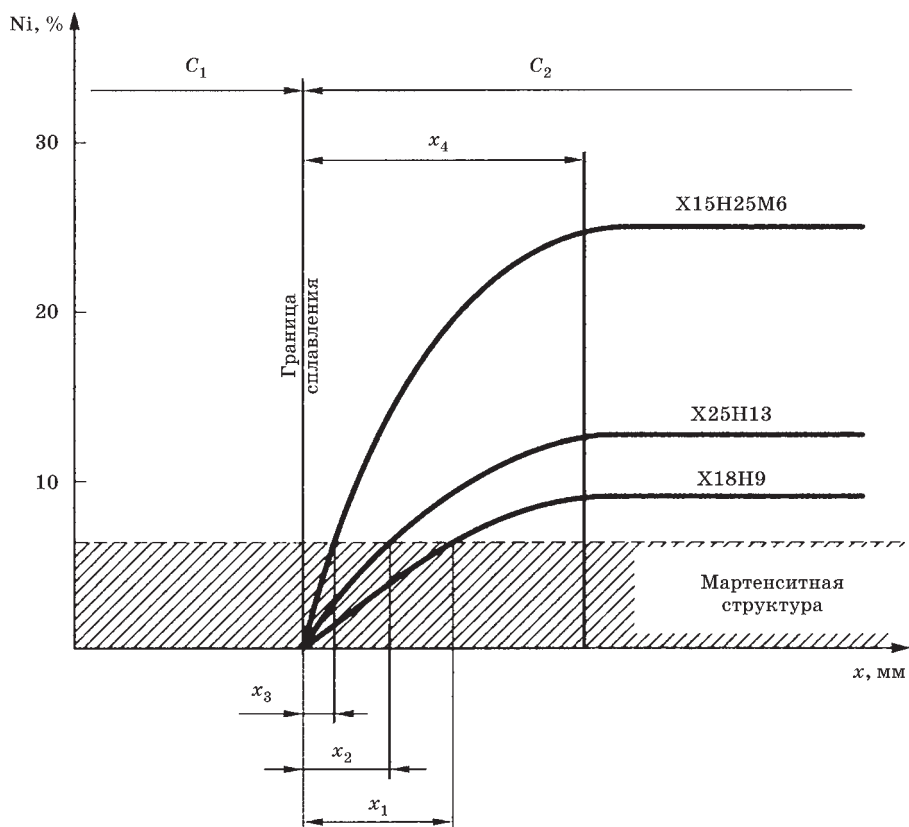


Рис. 7.2

Схема определения ширины участка хрупких межкристаллитных прослоек в зоне сплавления перлитной стали с аустенитным швом в зависимости от содержания никеля в шве:

C_1 — перлитная сталь; C_2 — металл сварного шва; x — ширина зоны переменного состава, x_1 – x_3 — значения толщины мартенситной прослойки, содержащей 7% Ni, при сварке со сталями X18H9, X25H13 и X15H25M6 соответственно.

в 835 раз, а при 900°C в 39 раз). Диффузионная подвижность легирующих элементов, образующих твердые растворы замещения, значительно меньше и проявляется лишь при температурах выше 1000°C.

Диффузионные процессы приводят к обеднению углеродом перлитной стали и его сосредоточению в слоях аустенитного шва, содержащих хром. Три фактора управляют завершенностью этого процесса: температура, время пребывания при высоких температурах и концентрация свободного углерода. Процесс начинается во время сварки и получает развитие при повторных нагревах, при термообработке и высокотемпературной эксплуатации. Это создает условия для закалки металла шва и последующего образования карбидов хрома.

Склонность к образованию холодных трещин увеличивается в слоях аустенитного металла шва, претерпевающих закалку. Холодные трещины такого вида получили название «отрыв», что означает отрыв аустенитного шва от перлитной стали.

Процессы в околошовной зоне. При высоких температурах в околошовной зоне развиваются процессы, связанные с оплавлением границ зерен основного металла, их обогащением легирующими элементами и примесями за счет диффузии из расплавленной сварочной ванны, а также из объемов зерен в связи с повышенной растворимостью элементов в жидкой фазе.

Последующая кристаллизация таких межзеренных прослоек создает микрохимическую неоднородность в околошовной зоне, снижающую сопротивляемость горячим и холодным трещинам и жаропрочные и коррозионные свойства сварного соединения среднеуглеродистых и высоколегированных сталей.

В закаленной околошовной зоне перлитной стали образуются холодные трещины типа «откол» и «частокол». Уменьшение ширины зоны переменной твердости до 0,15...0,25 мм позволяет устранить склонность к холодным трещинам. Это объясняется снижением объемного напряженного состояния в сверхтонких закаленных слоях.

Разрушение металла в околошовной зоне при длительной высокотемпературной эксплуатации также является результатом диффузионных процессов, когда образуется непрочный обезуглероженный слой со стороны перлитной стали, где углерод не связан в термостойкие карбиды. В обезуглероженном слое укрупняется зерно, падает прочность и возможно развитие высокотемпературной ползучести. В легированной стали, где углерод связан в термостойкие карбиды, обезуглероженный слой менее развит.

Термообработка сварных соединений. После сварки разнородных сталей в сварном соединении возникают остаточные напряжения вследствие различия температурных коэффициентов линейного расширения. Эти напряжения в большинстве случаев не могут быть сняты термообработкой и создают опасность как разрушения, так и изменения размеров конструкции во времени.

Термообработка соединений с аустенитным швом нецелесообразна в связи с развитием диффузионных процессов обезуглероживания и охрупчивания отдельных участков околошовной зоны.

Термообработка соединений с аустенитно-ферритным швом вызывает охрупчивание шва в результате перехода ферритной фазы в хрупкую σ -фазу. Лишь для швов, эксплуатируемых при высоких температурах и в агрессивных средах, необходима аустенизация (1150°C) и стабилизация (850°C).

Для соединений с перлитным низколегированным швом, а также с мартенситно-ферритным швом необходим подогрев и отпуск для предотвращения холодных трещин и повышения пластичности металла. При этом режимы термообработки назначают по наиболее легированной стали, входящей в разнородное соединение.

Таким образом, сварные соединения разнородных сталей могут иметь значительно изменяющуюся во времени химическую и структурную неоднородность, приводящую к неконтролируемому изменению механических свойств. Наиболее сильно эта неоднородность выражена при сварке перлитной стали с аустенитной.

Уменьшение влияния неоднородности свойств сварного соединения и обеспечение свариваемости достигается выбором сварочных материалов, способов и режимов сварки и термической обработки с учетом жесткости соединений, температуры эксплуатации и агрессивности среды.

7.2. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ СТАЛЕЙ РАЗНЫХ СТРУКТУРНЫХ КЛАССОВ

Одна из причин пониженной свариваемости при сочетании перлитной и аустенитной стали — образование хрупкого мартенситного слоя или скоплений карбидов в кристаллизационной прослойке со стороны перлитной стали. Образование этой прослойки объясняется ухудшением перемешивания жидкого металла в пристеночных слоях. При небольшом запасе аустенитности металла шва толщина этой прослойки может достигнуть критической величины, при которой происходит хрупкое разрушение сварного соединения.

Выбор способов сварки. Основной задачей технологии сварки является уменьшение толщины кристаллизационной прослойки в шве. Этого достигают применением концентрированных источников теплоты, разделкой кромок или их наплавкой, уменьшающей долю участия в металле шва свариваемых сталей, выбором процесса сварки с минимальной глубиной проплавления, обеспечивающего интенсивное перемешивание металла ванны.

Сварка в защитных газах обеспечивает снижение поверхностного натяжения, увеличение кинетической энергии переноса капель электродного металла и плазменных потоков в дуге и, соответственно, интенсивное перемешивание расплавленного металла. Добавление в аргон кислорода, азота и углекислого газа способствует снижению структурной неоднородности в зоне сплавления, так как кислород повышает температуру ванны за счет экзотермических окислительно-восстановительных реакций и перемешивание металла усиливается.

Ручная дуговая сварка дает положительные результаты за счет применения электродов с повышенным содержанием никеля и марганца, которые снижают температуру плавления присадочного металла. Это уменьшает плавление перлитной стали и, следовательно, долю участия ее в металле шва, что способствует сокращению ширины переходной прослойки.

Сварка под флюсом обеспечивает интенсивное перемешивание ванны при увеличении силы тока, напряжения или скорости сварки. Однако рост этих параметров приводит к неблагоприятному изменению схемы кристаллизации (увеличению угла срастания кристаллитов), что повышает вероятность образования горячих трещин. Более эффективно при сварке под флюсом применение электродов с низкой температурой плавления и дополнительный ввод охлаждающей присадки, снижающей температуру ванны, так как это уменьшает ширину одновременно кристаллизационных и диффузионных прослоек.

Выбор сварочных материалов и технологии сварки. Состав свариваемых сталей, их сварочно-технологические свойства и эксплуатационные требования к сварному соединению определяют необходимый состав сварочных материалов.

Сварка перлитных сталей с аустенитными выполняется сварочными материалами, обеспечивающими получение в шве аустенитной структуры. На диаграмме Шеффлера (см. рис. 7.1) точки П и Б показывают структуру свариваемых сталей. При соотношении их долей участия 0,4/0,6 без учета электродного металла шов после охлаждения будет иметь мартенситную или аустенитно-мартенситную структуру, соответствующую точке Г. Применив электрод типа Х15Н25 с большим запасом аустенитности (точка В на диаграмме)

в соотношении 50/50 к указанному выше расплаву, получим требуемый металл корневого шва со структурой аустенита (отрезок *ав*).

При формировании слоя 2 со стороны перлитной стали участвует основной металл (точка П) и корневой шов (отрезок *ав*), образуя ванну состава точки Д соответственно долей их участия. Учитывая долю участия электродного металла (точка В), в сумме получаем металл слоя 2 со структурой, соответствующей отрезку *бг*. Аналогично определяем, что металл слоя 3 со стороны аустенита будет иметь структуру, соответствующую отрезку *де*.

Аустенитный металл шва позволяет предотвратить образование участков с мартенситной или карбидной структурой в корневых швах и слоях, примыкающих к перлитной стали, но повышает склонность к возникновению горячих трещин, образующихся по границам зерен в однофазном аустенитном металле шва. Для ограничения развития ликвационных процессов при затвердевании применяют электроды типа Х15Н25АМ6, содержащие 6% молибдена и 0,2...0,3% азота. Легирование этими элементами повышает пластичность в температурном интервале хрупкости, препятствует возникновению высокотемпературной ползучести и межзеренному проскальзыванию в твердом металле и предотвращает образование горячих трещин.

Эти электродные материалы с однофазной аустенитной структурой шва применяют и при сварке перлитных сталей с термоупрочняемыми жаропрочными аустенитными сталями (табл. 7.2).

Таблица 7.2

Выбор электродного материала и режима термообработки при сварке сталей разных структурных классов

Группа свариваемых сталей (см. табл. 7.1)	Предельная температура эксплуатации, °С	Электродные материалы	Термическая обработка, °С
I + (X, XII)	350	Э-11Х15Н25М6АГ2	Не требуется
II + (X, XII)	400	Э-27Х15Н25В3Г2Б2Т	Отпуск
III + (X, XII)		Э-08Х15Н60Г7М7Т	
(I, II) + (VI, VIII)	300...350	Э-09Х1М, Св-08ХГСМА, Св-08ХМ	650...680 (подогрев, отпуск)
(I, II) + VII	300	Э-08Х24Н6ТАМФ	700...740
(I, II) + VII		Э-10Х25Н13Г2	

При сварке перлитных и аустенитных сталей группы IX применяют аустенитно-ферритные электроды, образующие в наплавленном металле 10...12% ферритной фазы. При доле участия перлитной стали в металле шва до 30% смешивание электродного и основного металла обеспечивает получение швов, содержащих 4...6% ферритной фазы, что исключает образование горячих трещин, но несколько увеличивает толщину кристаллизационной прослойки.

При сварке аустенитных сталей с перлитными (группы II–III), содержащими малое количество углерода и активные карбидообразователи для ограничения диффузии углерода, также применяют аустенитно-ферритные электроды, образующие в наплавленном металле 10–12% ферритной фазы.

Для сварных узлов, эксплуатирующихся при высоких температурах, применяют никелевые электроды (типа ХН60М15). В этом случае швы хорошо

работают при переменных температурах благодаря близости коэффициентов линейного расширения с перлитной сталью. Этими электродами заваривают дефекты литых сталей группы IV и V без последующей термообработки.

При необходимости применяют сварку со вставками из различных материалов или предварительную наплавку кромок перлитной стали аустенитным металлом, с последующей сваркой таких заготовок аустенитно-ферритными сварочными материалами с ограниченным количеством δ -Fe (2...6%).

Сварка аустенитной и среднеуглеродистой стали мартенситного класса требует применения более сложного варианта технологии. В этих соединениях в корневых слоях из-за разбавления металла шва углеродистой сталью (до 50%) возможно образование горячих трещин, а в верхних слоях — холодных трещин типа «отрыв» и «откол». Поэтому корневые слои выполняют электродами, содержащими до 60% никеля и 15% молибдена.

Другой вариант технологии предусматривает предварительную наплавку на закаливающуюся сталь аустенитного слоя, при которой производится предварительный или сопутствующий подогрев, обеспечивающий необходимую скорость охлаждения, с последующим отпуском для устранения закалки. После этого детали с наплавленными кромками сваривают с аустенитной сталью.

Сварка аустенитных (группы XI–XIII) и жаропрочных хромистых ферритных сталей (группа VIII) осуществляется аустенитными, аустенитно-ферритными и высокохромистыми электродами. Требуемую структуру металла получают при перемешивании этих сталей с электродным металлом при доле его участия в шве до 40%.

При рабочей температуре выше 500°C применяют электроды с высоким содержанием хрома (25...27%) и никеля (12...14%), а при эксплуатации в условиях термоциклирования — аустенитные электроды на никелевой основе для получения металла шва с примерно таким же коэффициентом линейного расширения, как у высокохромистой стали.

Соединения указанных сталей, работающие в неагрессивных средах, могут быть выполнены при значительном перемешивании с основным металлом без образования горячих трещин электродами типа X15H25AM6 с последующей термообработкой. Если термообработка невозможна, рекомендуется наплавка кромок закаливающихся сталей электродами на никелевой основе.

Сварка перлитных и высокохромистых сталей требует применения технологий и материалов, обеспечивающих в основном предупреждение образования закалочных структур и холодных трещин.

При сварке перлитных сталей с 12%-ными хромистыми сталями группы VI выбирают сварочные материалы, исключаящие образование хрупких переходных участков, мартенсита и холодных трещин в зонах сплавления сталей, а так же развитие диффузионных прослоек при отпуске и высокотемпературной эксплуатации.

Для обеспечения пластичности шва применяют сварочные материалы перлитного класса (см. табл. 7.2). В этом случае на переходных участках со стороны высоколегированной стали, содержащих до 5% хрома, сохраняется пластичность, вязкость, а также длительная прочность соединения.

Для снижения размеров диффузионных прослоек перлитный наплавленный металл должен легироваться определенным количеством более активных, чем хром, карбидообразующих элементов.

При сварке деталей больших толщин наплавляют кромки высоколегированной стали электродами типа Э-ХМ, а разделку заполняют электродами типа Э-42 или Э-50 в зависимости от требований к прочности перлитного шва. Температуру предварительного подогрева и отпуска определяют по более легированной, т. е. 12% -ной хромистой стали, но для уменьшения размеров диффузионных прослоек отпуск выполняют при минимально допустимой температуре.

При сварке перлитных сталей с более высоколегированными хромистыми сталями группы VII, содержащими 17–28% Cr, применяют электроды аустенитно-ферритного, а также аустенитного класса. Однако при этом следует учитывать структурную неоднородность в зоне сплавления аустенитного шва и перлитной стали. Термообработка в этом случае не требуется.

Следует отметить, что во всех случаях сварки разнородных сталей необходимо применять электроды с основным покрытием и флюсы на фтористо-кальциевой основе.

7.3. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ ОДНОГО СТРУКТУРНОГО КЛАССА

Перлитные стали, отличающиеся лишь уровнем легирования, сваривают электродами, применяемыми для менее легированной стали, если к швам не предъявляется требований повышенной прочности или жаропрочности и коррозионной стойкости. Однако технологические режимы сварки и температуру подогрева следует выбирать по рекомендациям для более легированной стали (табл. 7.3). Если нет возможности осуществлять подогрев при сварке конструкции, то производят предварительную наплавку на кромку более легированной стали электродами типа Э-42А. Толщину наплавляемого слоя выбирают такой, чтобы при сварке конструкции более легированная сталь не нагревалась выше температур $A_{с1}$ и не создавались условия для закалки.

Таблица 7.3

Выбор электродного материала и режима термообработки
при сварке разнородных перлитных сталей

Группы свариваемых сталей	Электродные материалы	Температура эксплуатации, °С	Термическая обработка, °С
I+II	Низкоуглеродистые	±60	Не требуется
I+III, I+V			630...650 (отпуск)
III+III	Низколегированные		Не требуется
	Аустенитные на железной основе		
I+IV	Низкоуглеродистые	До 350	670...700 (отпуск)
	Хромомолибденованадиевые	До 450	

Высокохромистые стали мартенситного (12% Cr), ферритного (28% Cr) и ферритно-аустенитного структурных классов при различных сочетаниях сваривают с использованием сварочных материалов и технологий, исключающих образование в металле шва холодных трещин и хрупких участков (табл. 7.4). При применении сварочных материалов ферритно-аустенитного класса сварку ведут при минимальной погонной энергии для предупреждения роста зерна, приводящего к охрупчиванию соединения.

Т а б л и ц а 7.4

Выбор электродного материала и режима термообработки при сварке разнородных высокохромистых сталей

Группы свариваемых сталей (см. табл. 7.1)	Электродные материалы	Условия эксплуатации	Термическая обработка
VI + VIII	Мартенситно-ферритные (12% Cr)	До 500°C	Отпуск
	Аустенитно-ферритные	До 400°C	Не требуется
VI + VII	Мартенситно-ферритные (12% Cr)	До 350°C в агрессивных средах	Отпуск
VI + IX	Ферритно-аустенитные	До 350°C	Не требуется

Режим подогрева назначают по рекомендациям для наиболее закаливающейся стали и после сварки проводят отпуск, не допуская полного охлаждения сварного соединения. После окончания термообработки необходимо ускоренное охлаждение для предотвращения 475°C хрупкости.

При сварке аустенитно-ферритными электродами термообработка не приводит к полному снятию сварочных напряжений из-за различия в коэффициентах линейного расширения шва и основного металла.

Аустенитные стали различного уровня и типа легирования сваривают с использованием сварочных материалов и технологий, исключающих образование горячих трещин кристаллизационного и подсолидусного типа, а также локальных разрушений и снижение коррозионной стойкости (табл. 7.5).

Т а б л и ц а 7.5

Выбор электродного материала и режима термообработки при сварке разнородных аустенитных сталей

Группы свариваемых сталей (см. табл. 7.1)	Электродные материалы	Условия эксплуатации	Термическая обработка
X + X	Аустенитно-ферритные	До 500°C	Не требуется
X + XI	Аустенитные	Свыше°C	Аустенизация и стабилизация
X + XII		До 500°C в агрессивных средах	Не требуется

Сварку сталей с малым запасом аустенитности производят электродами, обеспечивающими в шве 4...6% ферритной фазы.

При сварке различных стабильно-аустенитных коррозионностойких сталей, как правило, не допускается в швах наличие ферритной фазы. Необходимо применять сварочные материалы (типа Св-04Х15Н25М6Г2АФ), легированные

молибденом, марганцем и азотом, что обеспечивает получение швов с однородной аустенитной структурой без горячих трещин.

Для сварки аустенитных сталей, обладающих высокой жаропрочностью (до 1000°C), применяют электродные материалы, легированные углеродом, ниобием, титаном или бором и дающие наплавленный металл с аустенитно-боридной или аустенитно-карбидной структурой.

Термообработку сварных соединений аустенитных сталей производят по циклу стабилизации при 800...850°C только для снятия остаточных сварочных напряжений. Для конструкций, работающих при высоких температурах, рекомендуют аустенизацию при температуре 1100...1150°C.

7.4. СВАРКА ДВУХСЛОЙНЫХ (ПЛАКИРОВАННЫХ) СТАЛЕЙ

Двухслойные стали используют для изготовления аппаратуры, работающей в коррозионно-активной среде. Облицовочный, коррозионно-стойкий слой толщиной до 12 мм представляет собой хромоникелевую аустенитную (типа 12X18H10T, 08X18H10T, 12X18H12T, 08X18H12Б) или хромистую ферритную и мартенситно-ферритную (типа 10X13, 12X13) стали. В качестве основного слоя используют низкоуглеродистые или низколегированные стали (типа Ст3, 20К, 15ХМ) различной толщины.

Сварное соединение должно иметь шов с однородным облицовочным слоем, обладающим заданной коррозионной стойкостью, в котором между облицовочным и основным слоями отсутствуют участки с пониженными механическими свойствами.

Слои сваривают отдельно, используя различные сварочные материалы. В большинстве случаев сначала сваривают основной слой с использованием соответствующих сварочных материалов, а затем облицовочный слой, исключая его повторный нагрев.

Наибольшую трудность представляет сварка участка перехода от основного к легированному слою. Для сохранения коррозионных свойств легированного слоя при его сварке применяют сварочные проволоки и электроды с повышенным содержанием никеля и хрома, компенсирующим разбавление облицовочного слоя металлом подложки. Кроме того, применяют способы сварки ленточным и сдвоенным электродом, а также сварку на спуск или углом вперед, уменьшающие переплавление металла.

При *ручной дуговой сварке* с заполнением разделки со стороны основного низкоуглеродистого слоя в связи с отсутствием доступа к обратной стороне шва (рис. 7.3а) слой 1 выполняют электродами, соответствующими составу плакирующего слоя, а остальные слои — обычными электродами. При сварке с заполнением разделки со стороны облицовочного коррозионностойкого слоя (рис. 7.3б) первые слои выполняют обычными электродами, а слои 3 и 4 сваривают с использованием электродов типа Э-11Х15Н25М6АГ2 для исключения разбавления облицовочного слоя шва металлом подложки.

При *сварке под флюсом* толстолистного металла переходный слой выполняют низкоуглеродистой проволокой под кремне-марганцевым флюсом для

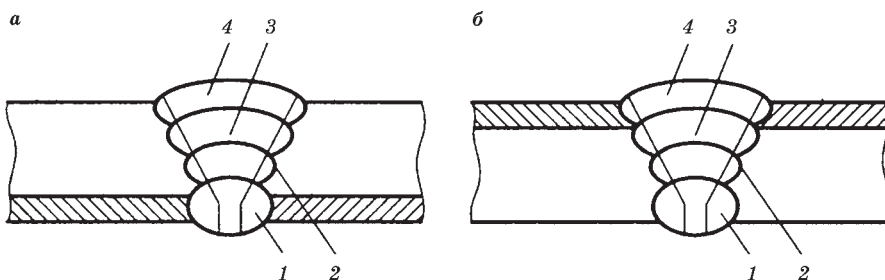


Рис. 7.3

Очередность (1–4) выполнения слоев при односторонней ручной дуговой сварке двухслойных сталей:

a — со стороны основного низкоуглеродистого слоя; *б* — со стороны плакирующего слоя.

предотвращения трещин или проволокой, имеющей повышенное содержание хрома и никеля (типа Св-10Х16Н25АМ6, Св-08Х19Н10МЗВ), с использованием безокислительных флюсов для сохранения коррозионной стойкости облицовочного слоя (рис. 7.4).

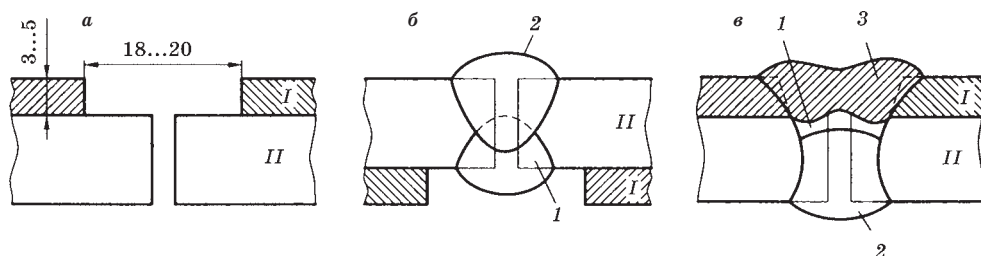


Рис. 7.4

Подготовка кромок (*a*) и последовательность (*б, в*) сварки под флюсом слоев (1–3) двухслойных сталей:

I — коррозионно-стойкая сталь; *II* — углеродистая сталь.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие стали являются разнородными в комбинированных соединениях?
2. Что определяет появление кристаллизационных и диффузионных прослоек в комбинированных соединениях?
3. В чем отличие присадочных материалов при сварке перлитных сталей с аустенитными и высокохромистыми?
4. Какую термообработку применяют для соединений сталей разных структурных классов?
5. Какие технологические особенности при сварке сталей одного структурного класса?
6. В чем основная особенность сварки двухслойных сталей?

Часть II

**ТЕХНОЛОГИЯ
И ОБОРУДОВАНИЕ
КОНТАКТНОЙ СВАРКИ**

В общей системе классификации *контактная сварка* как вид относится к *термомеханическому классу* по ГОСТ 19521-74. Это означает, что для ее выполнения необходимо использовать тепловую энергию и силу сжатия свариваемых деталей.

Детали, подлежащие контактной сварке, предварительно собираются определенным образом друг с другом. На рисунке 8.1а показано *нахлесточное соединение* деталей. Детали контактируют поверхностями по площади шириной B . Ширина зоны контакта B называется величиной нахлестки. Соединение деталей выполняется не по всей площади их контакта, а в отдельных местах, как это показано на рисунке 8.2а, б, в.

На рисунке 8.1б, в детали контактируют своими торцовыми поверхностями. Такой тип соединения называется *стыковым*. *Стыковое соединение* используют для деталей с разными формами поперечного сечения. Это могут быть прутки (круглые, квадратные, шестигранные), полосы и листы, трубы,

сортовой прокат (уголки, швеллеры, тавры и т. д.), рельсы и многое другое. В стыковых соединениях сварка выполняется по всей площади контакта деталей.

В процессе сварки детали сжимаются определенной силой, зависящей от типа материала, толщины деталей или площади их поперечного сечения. Силу сжатия на детали передают электроды, которые выполняют роль технологического инструмента. Сжатие может быть как локальным, т. е. в от-

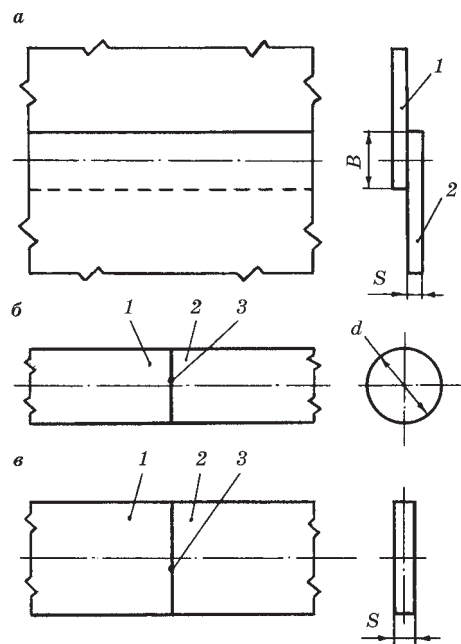


Рис. 8.1

Основные типы соединений деталей
для контактной сварки:

а — нахлесточное соединение; б — стыковое соединение круглых стержней; в — стыковое соединение листов и полос; 1, 2 — детали; 3 — стык; B — ширина нахлестки; S — толщина детали; d — диаметр стержня.

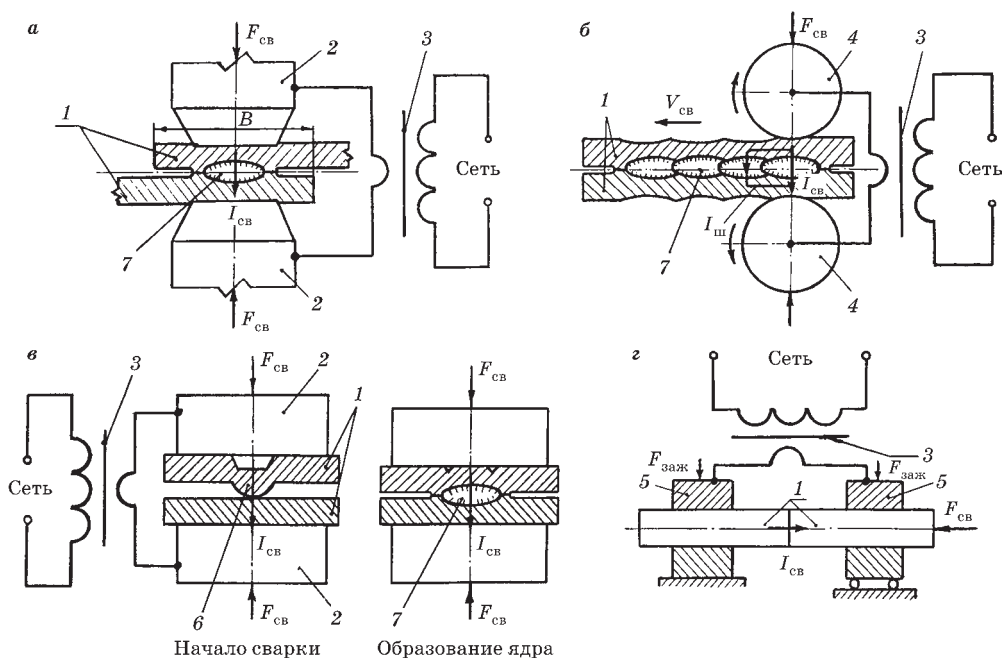


Рис. 8.2

Схемы разновидностей контактной сварки:

a — точечная; *б* — шовная; *в* — рельефная; *г* — стыковая; 1 — детали; 2, 4, 5 — электроды; 3 — сварочный трансформатор; *б* — рельеф (выступ); 7 — ядро; $I_{св}$, $I_{ш}$ — сварочный ток и ток шунтирования; $F_{св}$, $F_{зак}$ — силы сжатия деталей и зажатия деталей в электродах при сварке; $V_{св}$ — скорость сварки; B — величина нахлестки

дельных местах соединяемых поверхностей (рис. 8.2*а*, *б*, *в*), так и по всей поверхности контакта (рис. 8.2*г*).

Сварное соединение формируется в контакте между соединяемыми поверхностями деталей. Данное обстоятельство послужило основой для названия этого вида сварки контактной сваркой.

Кроме сжатия, детали необходимо нагреть в области их контакта для получения сварного соединения. В ряде случаев данный нагрев выполняется до расплавления некоторого объема металла обеих деталей, называемого ядром точки (рис. 8.2*а*, *б*, *в* поз. 7). В случае, как показано на рисунке 8.2*г*, нагрев можно вести как до пластичного состояния металла, так и до получения расплавленных слоев металла на соединяемых поверхностях деталей.

При контактной сварке для нагрева используют тепло, которое выделяется при протекании тока через свариваемые детали, имеющие определенное электрическое сопротивление. Подвод сварочного тока к месту нагрева деталей выполняется теми же электродами, которые обеспечивают их сжатие. Протекание сварочного тока происходит через некоторые объемы деталей и зону контакта между ними. Область, по которой протекает сварочный ток, называется зоной нагрева или зоной сварки. В пределах данной зоны происходит формирование сварного соединения.

Количество тепла Q , выделяющегося в зоне сварки, определяется законом Джоуля — Ленца:

$$Q = I_{\text{св}}^2 \cdot r \cdot t_{\text{св}}, \quad (8.1)$$

где $I_{\text{св}}$ и $t_{\text{св}}$ — сварочный ток и время сварки; r — сопротивление зоны сварки.

Данный физический закон является одним из важнейших для контактной сварки. Он определяет параметры, влияющие на выделение тепла, и долевое участие каждого параметра в тепловыделении.

Сопротивление зоны сварки характеризуется малыми величинами в пределах от десятков до сотен миллионных долей ома (мкОм).

Выделить необходимое для сварки количество тепла на таком малом сопротивлении практически возможно только за счет большого сварочного тока. Влияние тока на выделение тепла имеет квадратичную зависимость, т. е. более эффективно, чем время сварки. Поэтому контактная сварка характеризуется применением больших сварочных токов, величиной от нескольких тысяч до десятков и сотен тысяч ампер. Время протекания тока зависит от разновидности контактной сварки и находится в пределах от сотых долей секунды до нескольких десятков секунд. При других способах сварки с применением электрической энергии сварочный ток имеет меньшие значения. Например, при дуговой сварке величина сварочного тока составляет десятки и сотни ампер и очень редко до — 1500...2000 А.

Контактная сварка имеет свои термины и определения. В соответствии с ГОСТ 2601-84 *контактной сваркой* называется сварка с применением давления, при которой используется тепло, выделяющееся в контакте свариваемых частей при прохождении электрического тока. Приведенное определение отражает ранее изложенное общее представление о процессе контактной сварки.

Как вид, контактная сварка делится на ряд разновидностей или способов в зависимости от различных технических и технологических признаков (ГОСТ 19521-74). Главным технологическим признаком деления контактной сварки является форма сварного соединения. По этому признаку контактная сварка делится на *точечную, шовную, рельефную и стыковую* (рис. 8.2). Указанные способы имеют внутреннее деление, что будет частично рассмотрено далее.

Каждый способ контактной сварки графически изображается определенной схемой. Схема способа сварки содержит детали, электроды, выполняющие роль инструмента, источник сварочного тока и основные параметры режима сварки: сварочный ток $I_{\text{св}}$, силу сжатия $F_{\text{св}}$, время сварки $t_{\text{св}}$, скорость сварки $V_{\text{св}}$ и т. д. Умение изображать схемы разных способов сварки входит в объем инженерных знаний специалиста-сварщика.

Точечная сварка характеризуется получением сварного соединения между торцами электродов, которые подводят ток к месту сварки и передают на детали силу сжатия (рис. 8.2а). В зоне локального сжатия и нагрева деталей образуется сварное соединение, называемое точкой. Каждая точка должна содержать ядро, которое образуется вследствие расплавления и кристаллизации некоторого объема металла в контакте между деталями. Ядро придает прочность точечному соединению.

Детали могут соединяться одной точкой или группой точек, расположенных по заданному направлению, которые образуют сварной шов.

Точечной сваркой соединяют большое количество металлов и их сплавов: стали всех типов, алюминий и его сплавы, медные сплавы, кроме чистой меди, титан и его сплавы, специальные жаропрочные сплавы и т. д., кроме чугуна. Свариваемые толщины находятся в пределах от 0,3 до примерно 6 мм. В более редких случаях осуществляют сварку как больших толщин до 10 мм, так и малых — 0,08...0,2 мм. Основными параметрами процесса сварки являются: сварочный ток $I_{\text{св}}$ от 1,0 до 150 тыс. ампер, время сварки $t_{\text{св}}$ от 0,001 до 1,5 с и сила сжатия $F_{\text{св}}$ от 0,5 до 150 кН.

Точечная сварка в зависимости от количества одновременно свариваемых точек на контактной машине может быть одноточечной и многоточечной (несколько десятков точек). Многоточечная сварка более производительна, но требует сложного оборудования.

На рисунке 8.3а, б, в показаны примеры применения точечной сварки для изготовления изделий разной степени сложности. Детали изготавливают из листа холодной листовой штамповкой (гибкой, вытяжной, формовкой и т. д.), после чего сваривают. При сварке изделий сложной формы (рис. 8.3в), как правило, затрудняется подход электродов к месту сварки. Это требует применения специальных электродов.

Точечная сварка достаточно легко механизировается и автоматизируется, в том числе с применением роботов, что позволяет ее широко использовать при массовом производстве в автомобилестроении, в сельхозмашиностроении, в авиационном и т. д.

Шовная сварка (рис. 8.2б) характеризуется получением сварного соединения между вращающимися дисковыми электродами, которые подводят к деталям ток и передают на них силу сжатия. Характерными особенностями швовой сварки являются перемещение деталей вращающимися роликами и циклическое включение импульсов сварочного тока с определенными паузами.

Наиболее часто применяют сварку с непрерывным перемещением деталей во время протекания тока. Используется и шаговая шовная сварка, когда детали и ролики неподвижны при протекании сварочного тока, а перемещение деталей на определенный шаг происходит вращением роликов во время паузы между импульсами сварочного тока. Этот способ сварки является более сложным, но в некоторых случаях только он может обеспечить требуемое качество сварного соединения.

Процесс швовой сварки характеризуется образованием ядра точки при протекании каждого импульса тока. Ядра точек перекрываются, образуя герметичный сварной шов. Это достоинство швовой сварки определило ее главное применение для изготовления герметичных емкостей.

По диапазону свариваемых материалов, толщин, параметров процесса, методов изготовления деталей шовная сварка аналогична точечной.

В автомобилестроении шовную сварку используют для изготовления бензобаков (рис. 8.3г). Применяют шовную сварку для изготовления тонкостенных коротких труб (до 1000 мм), называемых обечайками (рис. 8.3д). Обечайку

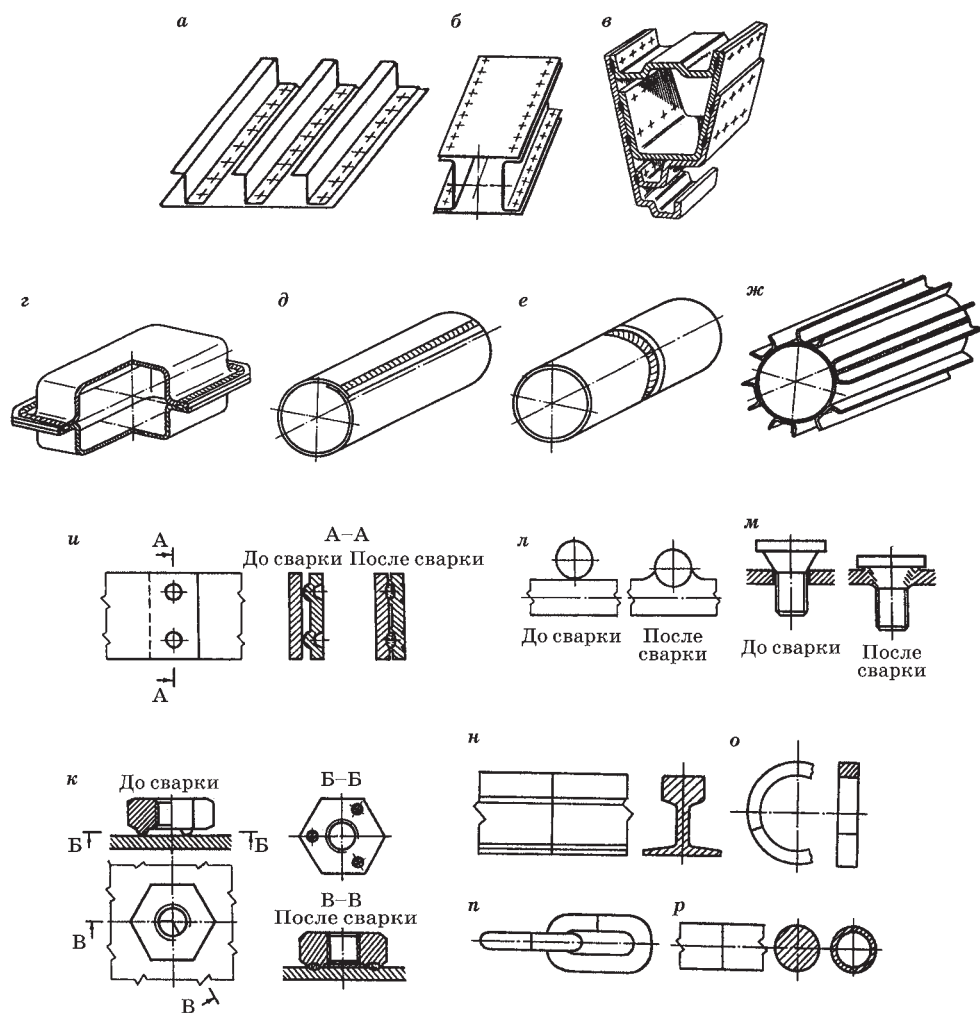


Рис. 8.3
Применение контактной точечной (а, б, в), шовной (з, д, е, ж), рельефной (и, к, л, м) и стыковой (н, о, п, р) сварки:

а — панель; б — коробчатый элемент; в — изделие сложной формы; з — бачок; д — сварная обечайка (короткая труба) с продольным швом; е — сварная обечайка из двух частей кольцевым швом; ж — оребренная труба; и — сварка листов; к — приварка гайки к листу; л — сварка прутков вкрест; м — приварка болта к листу; н — сварной рельс; о — сварное кольцо; п — сварная цепь; р — сварка прутков и труб.

вальцуют из листа и сваривают продольным швом. Обечайки можно сваривать друг с другом кольцевыми швами (рис. 8.3е). Шовная сварка находит применение при изготовлении оребренных труб, которые затем используют в теплообменных аппаратах (рис. 8.3ж).

Рельефная сварка (рис. 8.2в) характеризуется образованием сварного соединения на определенных участках, обусловленных их геометрической формой, в том числе и по выступам (рельефам) с использованием специальных

электродов. Электроды подводят к месту сварки ток и передают на детали силу сжатия. Вначале при протекании тока нагревается и пластически деформируется рельеф. Затем в области деформированного рельефа образуется ядро точки. Рельефной сваркой можно выполнить соединение в одном месте или одновременно в нескольких местах, а также по заданному контуру, что повышает производительность.

По диапазону свариваемых материалов, толщин и параметрам процесса рельефная сварка также аналогична точечной. Большое разнообразие соединений, выполняемых рельефной сваркой, обусловлено формой выступа. Часто выступы на одной из деталей делают штамповкой (рис. 8.3и, к), совмещая это с изготовлением самой детали. В некоторых случаях в качестве выступа (рельефа) используют «естественную» форму деталей, как это имеет место при сварке по «острой грани» (рис. 8.3м) или при сварке прутков вкрест (рис. 8.3л). В строительстве рельефной сваркой изготавливают арматурные сетки. Используется рельефная сварка в различных отраслях машиностроения, в приборостроении и в радиоэлектронике.

Стыковая сварка (рис. 8.2г) обеспечивает получение сварного соединения по всей стыкуемой поверхности торцов с использованием специальных электродов, подводящих к свариваемым деталям ток и передающих на них силу сжатия.

Имеются две разновидности стыковой сварки: стыковая сварка сопротивлением и стыковая сварка оплавлением. При *сварке сопротивлением* нагрев осуществляется до пластического состояния металла без оплавления стыкуемых торцов, а при *сварке оплавлением* — до обязательного образования слоя расплавленного металла на торцах обеих деталей. Окончательное формирование сварного соединения происходит при интенсивной пластической деформации металла в области стыка под действием осевой силы сжатия, называемой силой осадки.

Стыковая сварка позволяет сваривать практически все металлы и сплавы, в том числе и чистую медь, а стыковая сварка оплавлением — даже чугун.

При стыковой сварке в числе основных параметров принято использовать вместо величины тока плотность тока, а вместо силы сжатия — давление. Плотность тока находится в пределах от нескольких десятков до нескольких сотен ампер на миллиметр квадратный, давление составляет десятки и сотни мегапаскалей (МПа).

Примеры применения стыковой сварки показаны на рисунке 8.3н, о, п, р. Применение плетей из сваренных рельсов длиной в сотни метров снижает их износ, улучшает работу подвижного состава и повышает комфортность движения пассажирских вагонов. По примеру сварки деталей кольцевой формы изготавливают обод автомобильного колеса. Сварные цепи применяют в различных цепных передачах, в подъемниках шахтных клетей и якорей речных и морских судов. Стыковая сварка труб используется при строительстве тепловых и атомных электростанций, при изготовлении котлов и другого нагревательного оборудования, а также при строительстве магистральных трубопроводов. Применяется стыковая сварка при изготовлении составного режущего инструмента (фрез, сверл и т. д.).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. К какому классу относится контактная сварка?
2. Какие типы соединений выполняются контактной сваркой?
3. Что послужило основой для названия «контактная сварка»?
4. Какой закон определяет нагрев деталей при контактной сварке? Его математическая формулировка?
5. Каков порядок величин сварочного тока при контактной сварке?
6. Основные разновидности контактной сварки.
7. Как выполняется точечная, шовная, рельефная и стыковая контактная сварка?
8. Применение точечной, шовной, рельефной и стыковой контактной сварки.

9.1. ОБЩАЯ СХЕМА ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ

В соответствии с определением, контактная сварка относится к термомеханическому классу получения неразъемного соединения, когда предварительно сжатые детали нагреваются теплом, выделяемым током непосредственно в этих деталях и в переходных контактах между ними. При точечной, рельефной и шовной сварке, как правило, в плоскости контакта деталей формируется общая зона расплавленного металла (литое ядро). В результате последующего охлаждения и кристаллизации литого ядра между деталями образуется прочное и герметичное соединение.

Формирование соединения при указанных способах сварки происходит по схеме, состоящей из трех этапов I–III (рис. 9.1). Кратко остановимся на

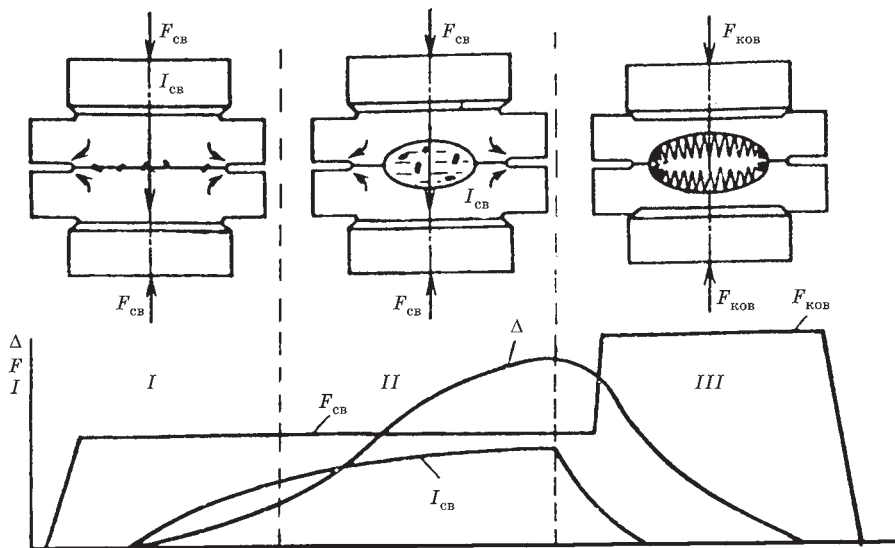


Рис. 9.1

Этапы формирования соединения при точечной сварке:

I, II, III — номера этапов формирования соединения; $I_{св}$ — сварочный ток; $F_{св}$ — сила сжатия деталей; t — время; Δ — перемещение электрода; \leftarrow — направление смятия микровыступов и течения металла при его пластической деформации.

рассмотрении основных и сопутствующих процессов на каждом из этапов формирования соединения на примере точечной сварки (рис. 8.2а).

Первый этап начинается с приложения силы сжатия к деталям посредством сварочных электродов. Обжатие деталей служит для устранения сборочных зазоров между деталями и формирования электрического контакта. При этом происходит микропластическая деформация микронеровностей и шероховатостей в контактах электрод — деталь и деталь — деталь. Общая упругая деформация электродов и деталей способствует формированию контурных площадок в контактах и начальных зазоров за их пределами. Последующее включение тока вначале приводит к относительно большому выделению тепла на контактах и повышению в них температуры. В результате снижается предел текучести металла, что облегчает дальнейшее сглаживание микронеровностей, дробление и частичное вытеснение поверхностных пленок, а также формирование физического контакта. Этап заканчивается в момент достижения условия текучести, когда интенсивность напряжений в зоне контакта деталь — деталь становится равной пределу текучести металла в контакте. На этом этапе в результате общего нагрева металла параллельно с основными процессами протекает и ряд сопутствующих процессов. Вследствие теплового расширения начинается процесс раздвигания электродов с одновременным увеличением зазора в контакте деталь — деталь, в который вытесняется часть нагретого металла. Начинается также процесс внедрения электродов в поверхность деталей.

Второй этап характеризуется дальнейшим повышением температуры, расплавлением металла и образованием ядра. Этап заканчивается выключением сварочного тока, когда размеры ядра (диаметр и глубина проплавления) достигнут номинальных значений. Процесс плавления сопровождается циркуляцией жидкого металла ядра от действия на него электромагнитных сил, возникающих в результате взаимодействия сварочного тока с собственным магнитным полем. Перемешивание металла приводит к разрушению оксидных пленок, которые в дальнейшем сепарируются или растворяются в объеме литого ядра. Расплавленный металл при этом удерживается от выплеска между деталями уплотнительным пояском, непрерывно формирующимся в результате пластической деформации металла в зазор между листами. Продолжается интенсивный рост глубины вмятины в контактах электрод — деталь, сопровождающийся процессом массопереноса и износом рабочей поверхности электрода. Вследствие теплопроводности происходит нагрев металла в околошовной зоне (вокруг литого ядра) и изменение в ней исходной структуры металла.

Третий этап начинается с выключения тока. Охлаждение и кристаллизация металла протекают при постоянно действующей внешней силе сжатия. В деталях формируется общее литое ядро. Продолжается теплопередача в околошовную зону и изменение структуры металла в этой части соединения. Процесс охлаждения сопровождается уменьшением объема металла и формированием поля остаточных напряжений. Для снижения уровня этих напряжений и предотвращения усадочных дефектов при сварке больших толщин рекомендуется уменьшать скорость охлаждения деталей и увеличивать силу сжатия и длительность ее приложения. Пластическая деформация охлаждающегося металла и внедрение электродов в детали продолжают до момента

превышения пределом текучести металла величину интенсивности напряжений в зоне контактов электрод — деталь.

На этом заканчивается цикл формирования соединения при точечной сварке. Формирование соединений при рельефной и шовной сварке имеют свои особенности, обусловленные типом соединения и формой шва. Однако рассмотренные физические процессы в той или иной степени завершенности протекают и при этих способах сварки.

В зависимости от роли физических процессов в формировании соединения, принято их разделять на основные и сопутствующие (рис. 9.2).



Рис. 9.2
Основные и сопутствующие процессы при формировании соединения

Высокое качество контактной сварки может быть обеспечено, если рассмотренные процессы приводят к созданию наиболее благоприятных физико-химических условий в каждой из основных зон межэлектродной области. Под межэлектродной областью понимается участок сварочной цепи, включающий рабочие части электродов и расположенные между ними свариваемые детали. Наиболее важными зонами между электродами являются: зона сварки или сварочный контакт; зона контактов между электродами и свариваемыми деталями; зона термического влияния, представляющая собой слой металла, расположенный по соседству с зоной сварки.

Для достижения высокого качества сварного соединения при любых разновидностях контактной сварки необходимо обеспечить:

- рациональный цикл нагрева и охлаждения металла литого ядра и зоны термического влияния;
- благоприятное механическое воздействие на металл межэлектродной области;
- предупреждение и устранение вредного влияния оксидов и загрязнений в зоне сварочного контакта и в приэлектродных контактах.

Оптимальный характер протекания перечисленных процессов в каждой из зон межэлектродной области в значительной мере зависит от правильности выбранной технологии сварки и, в частности, от режима сварки.

Режим сварки — совокупность электрических, механических и временных параметров процесса, обеспечиваемых сварочным оборудованием для получения качественного соединения. Часто качество сварного соединения отождествляется с его прочностью, которая определяется, главным образом, размерами литого ядра. Литое ядро образуется в пределах изотермы температуры плавления в момент окончания сварочного нагрева. Закономерность нагрева и пластической деформации металла и другие сопутствующие процессы и условия формирования соединения подробно рассмотрены в последующих разделах.

9.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И НАГРЕВ МЕТАЛЛА

9.2.1. ИСТОЧНИКИ ТЕПЛОТЫ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

Металл при контактной сварке нагревается и плавится за счет выделения теплоты на электрических сопротивлениях межэлектродной области при протекании через нее электрического тока. Основное количество теплоты, выделяемое между электродами за время сварки ($t_{\text{св}}$), определяется по закону Джоуля — Ленца:

$$Q_{\text{эз}} = \int_0^{t_{\text{св}}} i_{\text{св}}^2(t) r_{\text{эз}}(t) dt, \quad (9.1)$$

где $i_{\text{св}}(t)$ — мгновенные значения сварочного тока, меняющиеся в процессе сварки; $r_{\text{эз}}(t)$ — мгновенные значения активного сопротивления металла межэлектродной области в процессе нагрева при сварке.

Из уравнения (9.1) видно, что составляющие электрического сопротивления межэлектродной области $r_{\text{эз}}$ выступают в качестве внутренних источников тепла. Величины составляющих сопротивления $r_{\text{эз}}$ и их пространственно-временное распределение в зоне сварки существенно влияют на условия нагрева и температурное поле.

Для удобства анализа процессов тепловыделения при точечной сварке двух одинаковых деталей (рис. 9.3) принято общее сопротивление $r_{\text{эз}}$ представлять в следующем виде:

$$r_{\text{эз}} = 2r_{\text{д}} + 2r_{\text{эд}} + r_{\text{дд}}, \quad (9.2)$$

где $r_{\text{д}}$ — собственное активное сопротивление каждой из деталей; $r_{\text{эд}}$ — сопротивление контакта между электродом и деталью; $r_{\text{дд}}$ — сопротивление контакта между деталями.

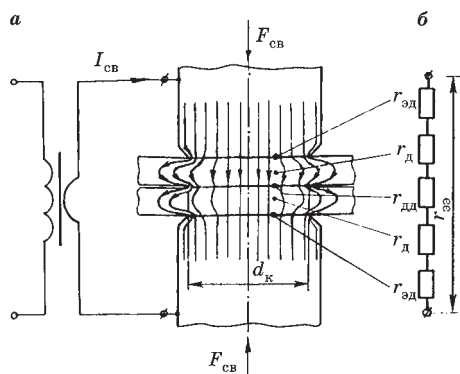
Следовательно, для точечной сварки формула (9.1) имеет вид

$$Q_{\text{эз}} = \int_0^{t_{\text{св}}} [2r_{\text{д}}(t) + 2r_{\text{эд}}(t) + r_{\text{дд}}(t)] i_{\text{св}}^2(t) dt. \quad (9.3)$$

Каждая из составляющих $r_{\text{эз}}$ (9.2) в той или иной степени зависит от удельного сопротивления материала деталей и электродов, распределения температуры,

Рис. 9.3
Электрическое сопротивление
межэлектродной области:

a — распределение сопротивлений; *б* — эквивалентная электрическая схема; $I_{\text{св}}$ — сварочный ток; $F_{\text{св}}$ — сила сжатия детали; $d_{\text{к}}$ — условный диаметр контакта; $r_{\text{эл}}$, $r_{\text{дд}}$, $r_{\text{д}}$ — контактные сопротивления электрод — деталь, деталь — деталь и собственное сопротивление деталей соответственно; $r_{\text{эо}}$ — общее электрическое сопротивление межэлектродной области.



силы сжатия, состояния поверхности и других факторов. Поэтому принято изменение составляющих $r_{\text{эо}}$ рассматривать в условиях холодного и горячего состояния контактов на первом и втором этапах формирования соединения.

9.2.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНТАКТА

Процесс контактной точечной сварки может быть осуществлен только при наличии электрической проводимости в межэлектродной области, которая определяется состоянием электрических контактов деталь — деталь и электрод — деталь.

Электрическая проводимость контактов формируется при сжатии свариваемых деталей электродами до их сближения, в результате чего одновременно образуются начальные механический и электрический контакты. При последующем включении сварочного тока проводимость контактов меняется в результате их нагрева и деформации.

При контактной сварке процесс формирования контактов состоит из следующих 2-х стадий.

Первая стадия длится от начала соприкосновения и сжатия свариваемых деталей до момента, предшествующего появлению первых очагов схватывания материала контактов. Эта стадия характерна для холодных или несвариваемых контактов. Обычно к таким контактам относят контакты между электродами и свариваемыми деталями.

Вторая стадия длится от момента появления первых зародышей схватывания до полного завершения процесса сварки.

Закономерности протекания первой и второй стадий распространяются на горячий контакт, которым является контакт между свариваемыми деталями в зоне их соединения.

О наличии электрического сопротивления контакта можно судить, если через металлические детали, сжатые силой F , пропустить небольшой ток и измерить падение напряжения ($u = I \cdot r$) на участке равной длины в области контакта u_{ab} и на самих деталях u_{ab}° (рис. 9.4*a*). При этом окажется, что $u_{ab} \gg u_{ab}^{\circ}$. Следовательно, электрическое сопротивление участка цепи, содержащего контакт, значительно превосходит сопротивление такого же участка цепи без контакта.

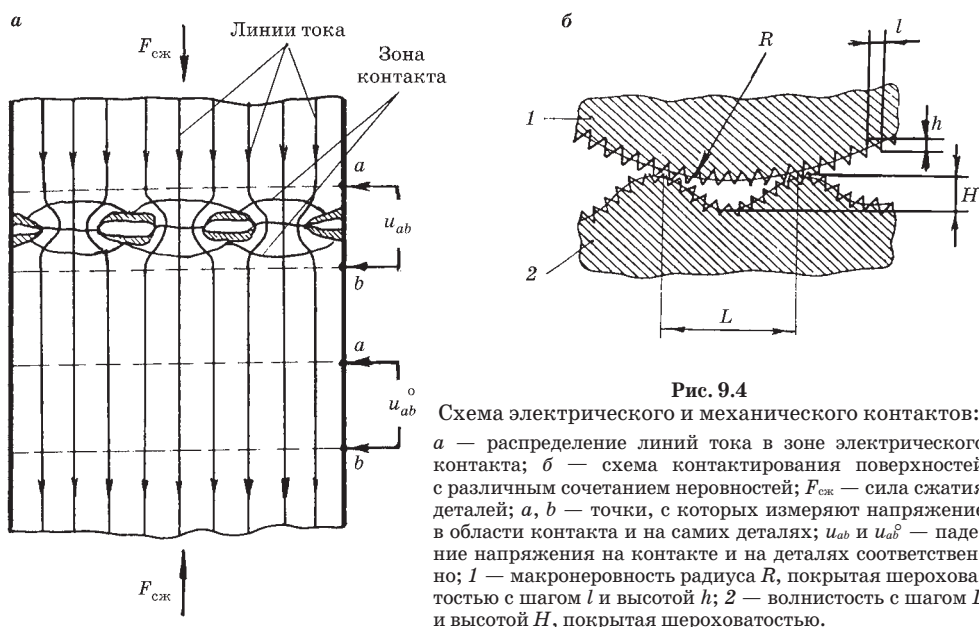


Рис. 9.4

Схема электрического и механического контактов:

a — распределение линий тока в зоне электрического контакта; b — схема контактирования поверхностей с различным сочетанием неровностей; $F_{сж}$ — сила сжатия деталей; a, b — точки, с которых измеряют напряжение в области контакта и на самих деталях; u_{ab} и u_{ab}^o — падение напряжения на контакте и на деталях соответственно; 1 — макронеровность радиуса R , покрытая шероховатостью с шагом l и высотой h ; 2 — волнистость с шагом L и высотой H , покрытая шероховатостью.

Для выяснения причин высокого сопротивления контактов рассмотрим строение контактной поверхности. Металлическая поверхность твердого тела (рис. 9.5б) представляет собой сложную структуру, состав и строение которой зависят от физико-механических свойств исходного материала, вида термомеханической или химической обработки поверхности, условий хранения и характера взаимодействия с окружающей средой.

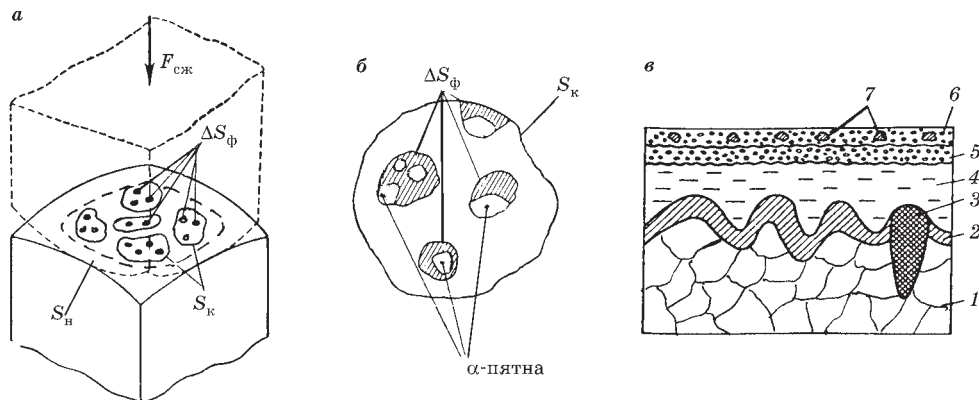


Рис. 9.5

Контактирование поверхностей:

a — схема контакта волнистой и шероховатой поверхностей; b — контурная (кажущаяся) контактная поверхность; $в$ — строение реальной поверхности тел: 1 — металл, 2 — оксидные и гидроксидные пленки, 3 — продукты коррозии, 4 — адсорбированная влага, 5 — масло, 6 — адсорбированные газы, 7 — пыль; $F_{сж}$ — сила сжатия деталей; S_n — номинальная площадь контакта; S_k — контурная площадь контакта; ΔS_ϕ — элементарные площадки фактического контакта; α — пятна элементарной проводимости.

Прокатанные или механически обработанные детали имеют неровную поверхность. При этом принято различать следующие виды неровностей, т. е. отклонений от идеально плоской и гладкой поверхности: макронеровность (R), волнистость (L, H) и шероховатость (микронеровность l, h) (рис. 9.4б). Если бы поверхности деталей и электродов были идеально гладкими и плоскими, то контакт между ними существовал бы по всей площади их касания. Эту площадь принято называть *номинальной площадью контакта* и обозначать S_n . Поэтому при точечной сварке номинальной площадью контакта S_n является вся площадь нахлестки, при стыковой сварке стержней — площадь их поперечного сечения (рис. 9.5а). Наличие волнистости и шероховатости на поверхности плоских деталей (рис. 9.4б) приводит к тому, что контакт между ними не будет сплошным. Лишь отдельные участки контактирующих поверхностей воспринимают действие силы сжатия. Средняя высота микронеровностей h зависит от способа обработки поверхности. После полирования она составляет 0,3...1 мкм, холодной прокатки — 3...10 мкм, обработки резцом — 10...80 мкм. Начальное соприкосновение деталей происходит в нескольких обособленных точках (ΔS_ϕ , рис. 9.5б), в результате смятия наиболее высоких выступов шероховатости.

Под действием силы сжатия ($F_{ск}$) эти точки упруго или пластически деформируются (сминаются), происходит сближение соприкасающихся поверхностей и в контакт вступает основная масса микронеровностей. Сумма всех этих соприкасающихся микронеровностей составляет *контактную поверхность*, площадь которой (рис. 9.5а) принято называть *фактической площадью контакта*, т. е. $S_\phi = \sum \Delta S_\phi$. Элементарные площадки фактического контакта ($\Delta S'_\phi$) размещаются в границах неравномерно расположенных *контурных площадок* S_k , образованных при смятии отдельных волн и макронеровностей. Площадь фактического контакта S_ϕ значительно меньше контурной площади S_k соприкосновения деталей. Экспериментально установлено, что при точечной сварке S_ϕ составляет 1...25% от S_k . Такая классификация площадей контактов общепринята в технологии машиностроения и сварке.

Следует иметь в виду, что для реальных свариваемых деталей только часть поверхности S_ϕ , воспринимающей силу сжатия, может пропускать электрический ток. Это связано с тем, что на поверхности, непосредственно прилегающей к металлу микровыступов, содержатся оксидные и гидроксидные пленки, на которых располагаются адсорбированные слои молекул воды, жиров, газов и пыль (рис. 9.5в).

Структура фактической поверхности контакта, воспринимающей силу сжатия, состоит из следующих участков:

- участка с металлическим контактом, в котором ток протекает без заметного переходного сопротивления, как это имеет место в компактном металле. Эти проводящие ток участки называются α -пятнами. Они образуются в результате действия силы $F_{ск}$ и пластической деформации микровыступов, разрыва пленок на них и появления трещин, в которые продавливается основной металл микровыступов;
- участка с квазиметаллическим контактом — поверхность, покрытая тонкой пленкой, которая пропускает ток благодаря туннельному эффекту.

Типичными пленками такого рода являются адгезионные слои атомов (толщиной менее 3,0 нм) на благородных металлах, а также пассивирующие пленки толщиной от 1,0 до 5,0 нм на инертных металлах, например, на не ржавеющих коррозионно-стойких сталях;

- участка, покрытого оксидными пленками, которые у большинства металлов являются полупроводниками с большим удельным электрическим сопротивлением. Эти пленки практически являются изоляторами. К полупроводникам с удельным сопротивлением $\rho_{пл} = (10^2 \dots 10^{10})$ Ом·м относятся оксиды цинка, меди, никеля, алюминия, железа и др. Эти оксидные пленки практически играют роль изоляторов, если они не разрушаются механически при сдавливании деталей силой $F_{сж}$ или электрически не пробиваются после того, как подано напряжение на сварочные электроды.

Особое место занимают оксиды, образующиеся на таких активных металлах, как алюминий, магний и цирконий. Их оксиды отличаются большой механической прочностью и высокой плотностью. Кардинально решается проблема электрической проводимости контактов при сварке алюминиевых, магниевых и циркониевых сплавов применением механической очистки или специальной химической подготовки поверхности деталей.

Адсорбированные молекулы воды, масел и газов на поверхности контактов существенно не влияют на проводимость в зоне сварки. Под действием силы сжатия они выдавливаются из контактов.

Таким образом, воспринимающая силу сжатия контактная поверхность, называемая фактической $S_{ф}$, очень мала и только часть ее пропускает электрический ток. При этом линии тока сужаются и стягиваются к элементарным α -пятнам проводимости (рис. 9.4а), что приводит к увеличению сопротивления контакта по сравнению со случаем, если бы проводимость осуществлялась по всей контурной площади S_k соприкосновения деталей (например, если они сварены). Это увеличение сопротивления есть *сопротивление стягивания* или сопротивление микровыступов. Оно локализуется в непосредственной близости от проводящих α -пятен. Иногда его называют внутренним сопротивлением контакта. Таким образом, под электрическим контактом понимается объем металла, расположенный по обе стороны от поверхности сопряжения проводников, в пределах которого происходит сужение путей тока (рис. 9.4а).

Следовательно, контактное сопротивление есть сопротивление очень малого, но конечного объема металла внутри контактов.

Оценить контактное сопротивление можно путем измерения напряжения u_{ab} (рис. 9.4а) с помощью щупов с точек a и b , расположенных на макроскопическом расстоянии от поверхности контакта. При этом полное сопротивление между эквипотенциальными поверхностями, проходящими через точки a и b , можно представить как сумму собственного сопротивления деталей r_{ab}^0 и сопротивления стягивания (внутреннего сопротивления) линий тока, определяемое микрогеометрией фактического контакта r_c :

$$r_{ab} = r_{ab}^0 + r_c. \quad (9.4)$$

Для холодных деталей $r_{\text{мг}}$ обычно существенно больше r_{ab}^0 .

Это выражение соответствует чистому металлическому контакту, когда нет оксидных пленок на поверхности $S_{\text{ф}}$. Если на поверхности контакта имеется пленка оксидов, то ее сопротивление должно быть добавлено к сопротивлению стягивания r_c .

Таким образом, контактное сопротивление, обусловленное стягиванием линий тока к микроконтактам шероховатости и наличием оксидов, равно

$$r_k = r_c + r_{\text{пл}}. \quad (9.5)$$

Сопротивление стягивания круглой контактной поверхности радиуса a для постоянного тока можно представить как

$$r_c = \frac{\rho}{2a}, \quad (9.6)$$

где ρ — удельное сопротивление материала контактов.

Сопротивление толстой оксидной пленки с высоким удельным сопротивлением $\rho_{\text{пл}}$:

$$r_{\text{пл}} = \frac{\rho_{\text{пл}} \Delta}{\pi a^2}, \quad (9.7)$$

где Δ — толщина оксида.

В процессе контактной сварки поверхность электродов и деталей в межэлектродной области подвергается воздействию электротермомеханических нагрузок, что приводит к изменению физико-механических свойств и строения приконтактных слоев материала и, следовательно, изменению электрического сопротивления контактов.

На *электрическое сопротивление несвариваемых контактов* влияют следующие факторы:

- удельное электрическое сопротивление металла;
- сопротивление контактирующих металлов смятию;
- чистота обработки контактирующих поверхностей и наличие на них оксидов и других загрязнений;
- сила сжатия деталей;
- температура в зоне контакта.

Удельное электрическое сопротивление металлов и сплавов в основном определяется типом кристаллической решетки и химическим составом (табл. 9.1). Однако эта характеристика для микровыступов может быть существенно больше в результате наклепа поверхности деталей при их механической обработке. Очевидно что, чем больше удельное сопротивление материала выступов, тем больше контактное сопротивление r_k . Удельное сопротивление при сварке растет с повышением температуры. Зависимость ρ от T имеет вид

$$\rho_T = \rho_0 (1 + \alpha T), \quad (9.8)$$

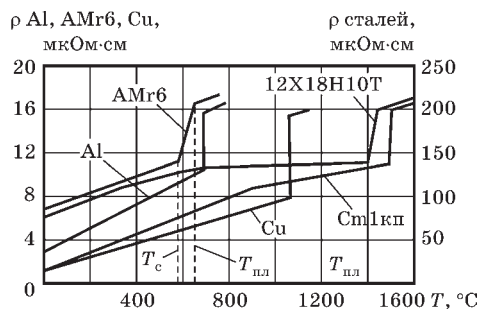
где ρ_T — удельное сопротивление при $T^\circ\text{C}$; ρ_0 — то же при 0°C ; α — температурный коэффициент сопротивления, приблизительно равный для чистых немагнитных металлов (медь, серебро, алюминий, титан) $0,004 \text{ 1/K}$. Для стали он не постоянен. Зависимость ρ_T от T для некоторых металлов дана на рисунке 9.6.

Теплофизические и механические свойства некоторых материалов

Материал	λ тепловое электро- сопротивление ρ , мкОм·м	Коэффициент λ , Вт/(м·К)	Коэффициент температуро- проводности $\alpha \times 10^4$, м ² /с	λ тепловая теплоемкость c , кДж/(кг·К)	Плотность γ , кг/м ³	Температура плавления $T_{пл}$, °С	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_B , МПа
Низкоуглеродистые стали	0,13	57	0,15	0,46	7800	1530	180(35)	330
Низко- и средне- легированные стали	0,21	39,4	0,1	0,48	7850	1480	950(50)	1100
Коррозионностойкие стали	0,75	16,4	0,04	0,5	7860	1440	200(80)	560
Сплавы обычной и повышенной жаро- прочности	0,9–1,4	10–13	0,025–0,05	0,44	8350–8880	1320– 1400	350(220) 550	700–900
Титановые сплавы	1,1–1,6	8–10	0,025–0,035	0,5–0,58	4590–4890	1660	600–1180	750–1300
Алюминиевые и магниевые сплавы	0,034–0,13 0,12	100–180 96	0,45–0,65 0,52–0,80	0,82–0,9 1,09	2780–2900 1780	620–654 632	100(45)–280(80) 200(45)	170–420 270
Медные сплавы	0,065–0,08	80–110	0,24–0,33	0,38–0,42	8230–8500	910	110(45)	375

*В скобках приведены средние значения $\sigma_{0,2}$ при температуре (0,5–0,6) $T_{пл}$; прочие характеристики — при нормальной температуре.

Рис. 9.6
Коэффициенты удельного
электросопротивления некоторых металлов
в зависимости от температуры нагрева:
 ρ — удельное сопротивление материала; T_c и $T_{пл}$ —
температура солидуса и температура плавления
соответственно.



Сопротивление контактирующих металлов смятию определяет способность выступов контактной пары упруго-пластически деформироваться под действием $F_{ск}$. Сопротивление контактирующих металлов смятию называют также контактной твердостью H , которую измеряют как твердость по Бринеллю. В технологии машиностроения величину H_B для всех видов станочной обработки рекомендуется принимать в среднем равной тройному пределу текучести металла:

$$H_B \approx 3\sigma_T. \quad (9.9)$$

Следовательно, чем тверже металл, тем меньше S_ϕ и тем больше контактное сопротивление стягивания r_c . Размеры S_ϕ в контакте пары металлов разной твердости будут определяться механическими свойствами более мягкого материала. Поэтому стягивание линий тока в твердой детали и ее сопротивление в контакте с мягким меньше, чем в контакте с твердым. При сжатии хорошо очищенных стальных деталей электродами из меди и ее сплавов с высокой проводимостью принимают $r_{эд} \leq 0,5 r_{дл}$.

Наличие оксидов и разная химико-механическая обработка поверхности деталей и электродов могут увеличить r_k в сотни и тысячи раз. Например, контактное сопротивление травленых пластин низкоуглеродистой стали толщиной 3 мм, измеренное при $F_{ск} = 2$ кН, составляло около 300 мкОм, очищенных наждачным кругом и шлифованных — 100 мкОм, обработанных резцом — 1200, покрытых окалиной — 80 000, покрытых окалиной и ржавчиной — 300 000 мкОм. Опыты показывают, что стальные пластины, покрытые окалиной и ржавчиной, практически не проводят ток и для их сварки необходимо механическим или химическим способами удалить поверхностные загрязнения.

С ростом силы $F_{ск}$ контактное сопротивление чистых и покрытых оксидом металлов уменьшается (рис. 9.7а). Это объясняется увеличением S_ϕ и S_k в результате повышения степени смятия микро- и макровыступов в контактах электродов с деталями и между деталями и частичным разрушением на них поверхностных пленок. Существенная неоднородность свойств поверхностей деталей и электродов определяет большой разброс значений контактного сопротивления, который уменьшается с увеличением $F_{ск}$ (рис. 9.7б). Следует иметь в виду, что большие и нестабильные значения r_k являются одним из возмущающих факторов процесса контактной сварки и могут приводить к образованию выплесков и разбросу размеров литого ядра, т. е. прочности соединения.

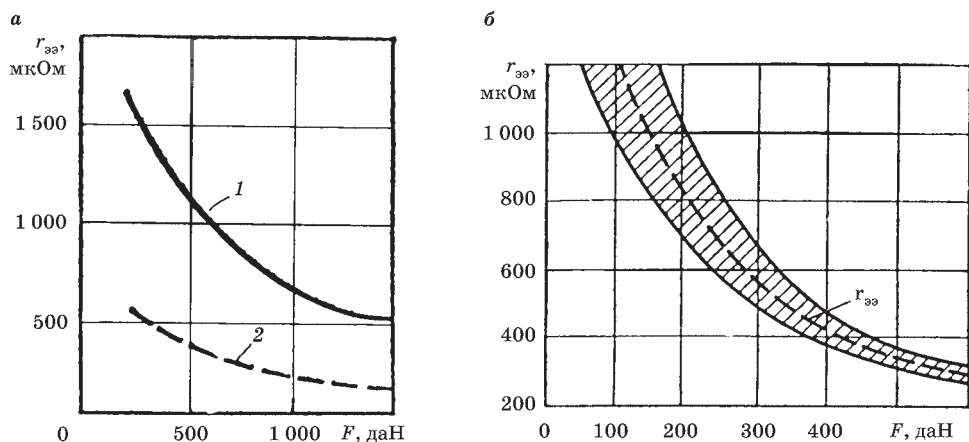


Рис. 9.7

Зависимость $r_{эо}$ от силы сжатия:

a — для титанового сплава ВТ 6 толщиной 2 + 2 мм: 1 — обезжиривание, 2 — механическая зачистка; *б* — для стали Х15Н5Д2Т толщиной 1 + 1 мм, заштрихована область разброса; $r_{эо}$ — «холодное» электрическое сопротивление межэлектродной области; F — сила сжатия деталей.

На сопротивление деформации металла микровыступов и σ_T в условиях контактной сварки заметное влияние оказывает степень и скорость пластической деформации. Эти характеристики процесса определяются программой приложения $F_{сж}$.

В производственных условиях для обеспечения высокой скорости точечной (рельефной) сварки на машинах с пневматическим приводом сжатия, давление электродов прикладывается к деталям с ударом (рис. 9.8). При этом *ударная составляющая силы сжатия* F_1 , как правило, в 2...3 раза превышает $F_{св}$.

Измерения контактных сопротивлений $r_{эо}$ и $r_{дл}$ пластин толщиной 1,5 мм низкоуглеродистой стали и магниевого сплава (рис. 9.9), сжатых электродами с диаметром рабочей поверхности 5 мм, показывают существенное (в 2...3 раза) снижение $r_{эо}$ и $r_{дл}$ при ударном приложении силы по сравнению с плавным для всего диапазона изменения $F_{сж}$. Наблюдаемое снижение r_k объясняется увеличением степени пластической деформации микровыступов и дополнительным дроблением оксидов на контактных поверхностях при ударном приложении $F_{сж}$.

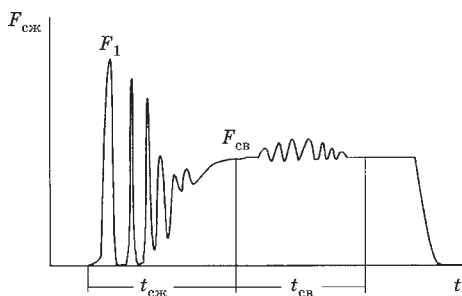


Рис. 9.8

Характер изменения силы сжатия в цикле работы сварочной машины с пневматическим приводом:

$F_{сж}$ — сила сжатия; F_1 — ударная составляющая силы сжатия; $F_{св}$ — сила сжатия при сварке; t — время; $t_{сж}$ — время установления силы сжатия; $t_{св}$ — время сварки.

Сопротивление контакта очень сильно изменяется при нагреве с включением сварочного тока. С увеличением температуры контакта T_k растет ρ металла, что ведет к увеличению r_c (9.6). С другой стороны, с ростом T_k

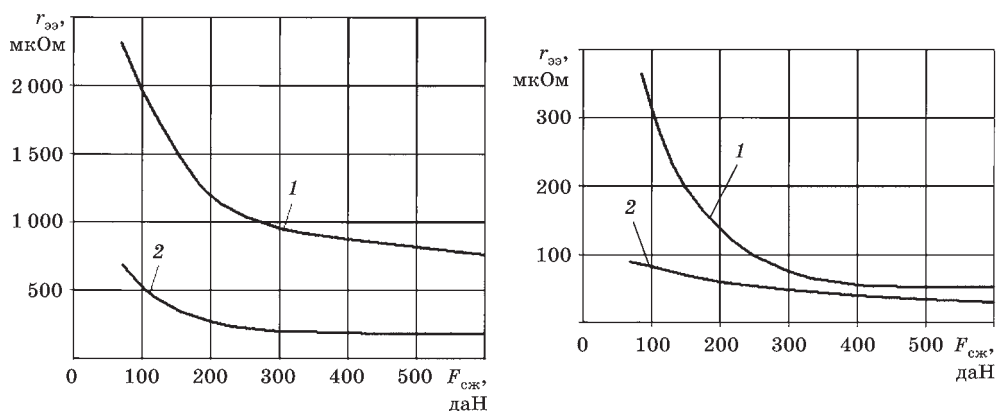


Рис. 9.9

Зависимость $r_{эо}$ при плавном (1) и ударном (2) приложении силы сжатия:

a — для низкоуглеродистой стали 08 кп толщиной 1,5 + 1,5 мм; *б* — для магниевого сплава толщиной 1,5 + 1,5 мм; $r_{эо}$ — «холодное» электрическое сопротивление межэлектродной области; $F_{сж}$ — сила сжатия.

снижается $\rho_{пл}$ оксидных пленок и, следовательно, уменьшается $r_{пл}$ (9.7). Одновременно с этим уменьшается сопротивление деформации микровыступов из-за снижения предела текучести и твердости металла, которые особенно резко снижаются при достижении температуры рекристаллизации ($0,25...0,3 T_{пл}$). Два последних фактора — снижение $\rho_{пл}$ и σ_T — создают условия для разрушения оксидов и увеличения числа и размеров проводящих микроплощадок, что приводит к резкому снижению r_k . При этом контактное сопротивление $r_{дд}$ снижается практически до нуля, а $r_{эд}$ — до относительно малой величины. Такое изменение r_k при обычном цикле точечной сварки происходит за время $0,1...0,2 t_{св}$, после чего $r_{эо}$ (9.2) определяется в основном сопротивлением самих деталей $2r_d$.

Ранее отмечалось, что контактные сопротивления ($r_{дд}$ и $r_{эд}$) выступают в качестве внутренних источников тепла при сварке и влияют на условия нагрева и температурное поле. Эксперименты по калориметрированию и оценочные расчеты показывают, что доля теплоты, выделяемой на контакте, не превышает 5...10% общей энергии, генерируемой в межэлектродной области, в силу быстрого снижения r_k и локальности тепловыделения, сосредоточенного в объеме микрошероховатостей контактной поверхности. Однако концентрированное выделение энергии в плоскости сварочного контакта приводит к появлению у контакта тонкого слоя высоконагретого металла с высоким удельным сопротивлением. В этом слое, при дальнейшем пропускании тока, происходит интенсивное местное тепловыделение, которое оказывает значительное влияние на температурное поле в свариваемых деталях.

Роль контактных сопротивлений в качестве источников теплоты возрастает при сварке деталей малых толщин и сечений, у которых высота микровыступов соизмерима с толщиной деталей. Также весьма значительно тепловыделение на контактах при сварке стали или жаропрочных сплавов, имеющих высокие

значения ρ и σ_t в нагретом состоянии и при сварке алюминиевых и магниевых сплавов, покрытых оксидной пленкой.

Если сопротивление контакта между деталями $r_{\text{лд}}$ значительно больше его оптимальной величины для данного случая сварки, то велика вероятность образования начального выплеска, мала стабильность тепловыделения и, как следствие, нестабилен размер литого ядра. При слишком большом значении $r_{\text{эд}}$ растет вероятность появления на наружной поверхности деталей подгаров, подплавлений, глубоких вмятин и других дефектов. На рабочей поверхности электродов растет слой оксидов, что снижает стойкость электродов, поэтому требуется более частая их зачистка и заправка, что уменьшает общий срок службы электродов.

Для достижения стабильных показателей качества сварки необходимо обеспечить минимально возможный разброс мгновенных значений контактных сопротивлений $r_{\text{эд}}$ и $r_{\text{лд}}$ при сварке однотипных соединений, что можно достигнуть следующими технологическими приемами (см. гл. 11):

- очисткой поверхности деталей от окислов и загрязнений перед их сваркой с использованием химических или механических способов и контролем электрического сопротивления $r_{\text{эо}}$;
- предварительным обжатием зоны сварки для получения требуемого значения $r_{\text{эо}}$ в холодном состоянии;
- использованием специальной программы изменения сварочного тока в начальный период его действия (модуляция переднего фронта или подогрев зоны сварки предварительным подогревающим импульсом тока);
- периодической и своевременной очисткой и заправкой рабочей поверхности электродов.

Перечисленные приемы в сочетании с оптимальными значениями параметров режима обеспечивают отсутствие схватывания и сварки в электродных контактах и созданию условий в контакте между деталями для последующего расплавления металла и формирования литого ядра стабильных размеров.

Помимо электрического сопротивления, важным свойством контактов является их теплопроводность или обратная ей величина — *термическое сопротивление*.

Термическое сопротивление контакта является следствием стягивания линий теплового потока к пятнам непосредственного контакта и наличия малотеплопроводной межконтактной среды, заполняющей пространство между выступами неровностей.

В первом приближении можно считать, что общая тепловая проводимость контакта является суммой проводимости мест фактического контакта α_m и проводимости межконтактной среды α_c , т. е. $\alpha_k = \alpha_m + \alpha_c$ или, выразив проводимость через термические сопротивления контакта, получим:

$$\frac{1}{W_k} = \frac{1}{W_m + W_o} + \frac{1}{W_c}. \quad (9.10)$$

Составляющие общего термического сопротивления W_k контакта имеют различный механизм образования. Первая составляющая образуется в результате

стягиванием линий теплового потока к пятнам фактического контакта, т. е. сопротивления W_m , и наличия препятствий на их пути в виде оксидной пленки, т. е. сопротивления W_o . Вторая составляющая (W_c), является следствием наличия малотеплопроводной среды в зоне контакта (например, воздуха, масла или следов влаги).

Отсутствие сплошного механического контакта приводит к температурному перепаду между соприкасающимися поверхностями деталей при прохождении через них теплового потока. Так, например, температура поверхности металла под электродом всегда выше температуры поверхности электрода. На стадии нагрева разность температур может достигать 200...300 градусов. Эта разность температур вызвана не только различным выделением джоулевого тепла в контакте со стороны электрода и со стороны детали, но и наличием препятствия (термического сопротивления) для теплового потока в массу охлаждаемого электрода.

Термическое сопротивление контакта в значительной мере определяется теми же факторами, что и электрическое сопротивление контакта. Очевидно, что термическое сопротивление контакта уменьшается с повышением теплопроводности контактирующих металлов. Установлено, что при увеличении силы сжатия термическое сопротивление будет снижаться за счет увеличения фактической площади касания поверхностей и, наоборот, уменьшение нагрузки повысит термическое сопротивление. Увеличение чистоты обработки контактных поверхностей снижает термическое сопротивление контакта. Нагрев контакта протекающим по нему сварочным током приведет к снижению термического сопротивления за счет понижения твердости материалов и увеличения теплопроводности межконтактной газовой среды.

Поскольку термическое сопротивление контактов влияет на теплообмен в межэлектродной области, важно снизить и стабилизировать термическое сопротивление, чтобы обеспечить стабильное температурное поле в межэлектродной области. Методы стабилизации термических сопротивлений контактов те же, что и для стабилизации электрических сопротивлений контактов.

9.2.3. СОБСТВЕННОЕ АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ

Общее электрическое сопротивление в межэлектродной области r_{Σ} при точечной сварке складывается из сопротивлений контактов и собственного сопротивления свариваемых деталей $2r_d$ (9.2). На сопротивлении $2r_d$ при прохождении через него электрического тока выделяется основное количество теплоты [первое слагаемое уравнения (9.3)].

Точное измерение собственного сопротивления детали затруднено из-за сложности присоединения милливольтметра к точкам A и B , находящимся на эквипотенциальных линиях, отстоящих на микроскопическом расстоянии от границы контакта (рис. 9.10а). Поэтому судят о нем по результатам математического моделирования электрических полей.

Для определения собственного сопротивления каждой свариваемой детали сначала рассмотрим поле электрического тока в пластине толщиной s_o , ток к которой подводится через два круглых контакта диаметром d_o (рис. 9.10а).

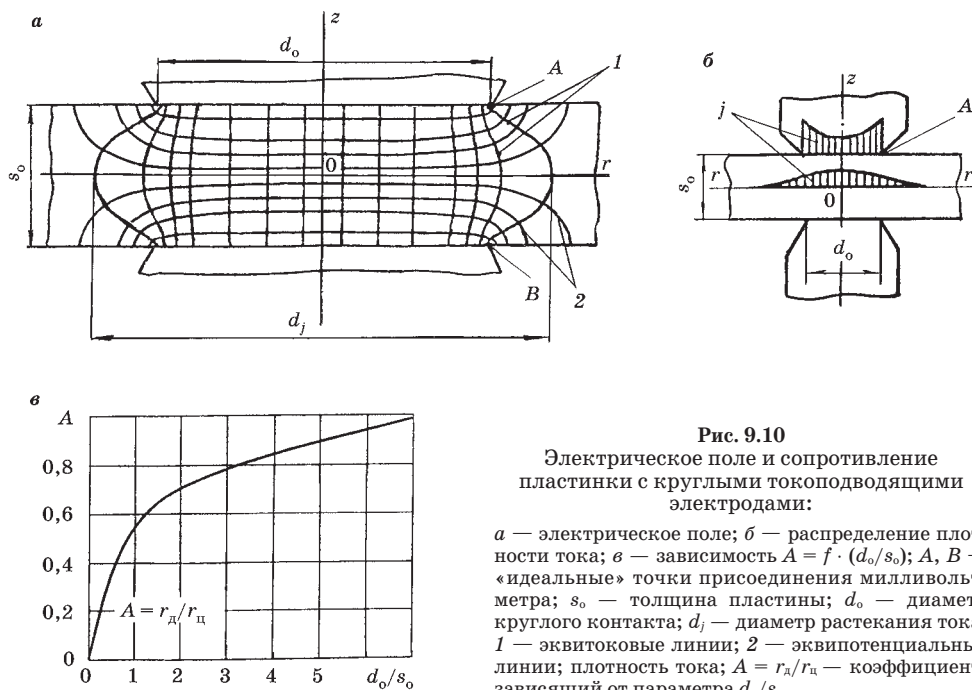


Рис. 9.10
Электрическое поле и сопротивление
пластинки с круглыми токоподводящими
электродами:

a — электрическое поле; *б* — распределение плотности тока; *в* — зависимость $A = f(d_0/s_0)$; *A*, *B* — «идеальные» точки присоединения милливольтметра; s_0 — толщина пластины; d_0 — диаметр круглого контакта; d_j — диаметр растекания тока; 1 — эквипотенциальные линии; 2 — эквипотенциальные линии; плотность тока; $A = r_d/r_{\text{ш}}$ — коэффициент, зависящий от параметра d_0/s_0 .

Электрическое поле в деталях описывается дифференциальным уравнением Лапласа, которое в цилиндрических координатах (вследствие осевой симметрии относительно оси z) может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{r \partial r} = 0, \quad (9.11)$$

где φ — потенциал в рассматриваемой точке; z и r — координаты точки; ρ — удельное электросопротивление в каждой точке сечения.

Решение уравнения (9.11) производят методом конечных разностей с помощью ЭВМ. По результатам расчета А. С. Гельманом было определено распределение плотностей тока в любом сечении рассматриваемого пространства (рис. 9.10б) и предложена инженерная методика расчета собственного сопротивления детали r_d .

Результаты расчета показывают (рис. 9.10б), что плотность тока в различных сечениях детали неравномерна. Вблизи контактной поверхности в результате растекания линий тока плотность тока растет от центра к периферии контакта, достигая максимума в точке А. В среднем сечении (плоскость $r-r$) пластинки наибольшая плотность тока совпадает с осью z .

Неравномерное распределение плотности тока в объеме детали есть результат одновременного действия ряда факторов, главными из которых являются геометрический и температурный. Определяющим является геометрический фактор, характеризующийся отношением d_0/s_0 . Чем оно больше, тем

равномерное поле плотности тока в центральной зоне детали — в объеме столбика диаметром d_o .

В результате растекания тока до диаметра d_j собственное сопротивление детали r_d будет меньше сопротивления цилиндра $r_{ц}$ диаметром d_o и высотой s_o . Поэтому для *равномерно нагретой детали* можно записать:

$$r_d = Ar_{ц} = A\rho_{\tau} \frac{s_o}{\pi d_o^2 / 4}, \quad (9.12)$$

где A — коэффициент (рис. 9.10в), учитывающий изменение сопротивления детали r_d относительно сопротивления цилиндра $r_{ц}$ ($A = r_d/r_{ц}$), зависящий от отношения d_o/s_o ; ρ_{τ} — удельное сопротивление металла детали при $T^{\circ}\text{C}$ (для холодной детали оно равно ρ_o).

При контактной точечной сварке двух деталей одинаковой толщины электрическое поле отличается от рассмотренного ранее (рис. 9.10), так как детали неравномерно нагреты в осевом (рис. 9.11) направлении. Для расчета тепловых процессов принято сопротивление деталей определять к концу процесса сварки $2 \cdot r_{д.к}$, когда фактический контакт между электродом и деталью распространяется на всю контурную площадку их касания диаметром d_s , а в контакте между деталями условно принимают, что диаметр уплотнительного пояса $d_{п} = d_s$. Соответствующая принятым допущениям расчетная схема поля тока приведена на рисунке 9.11.

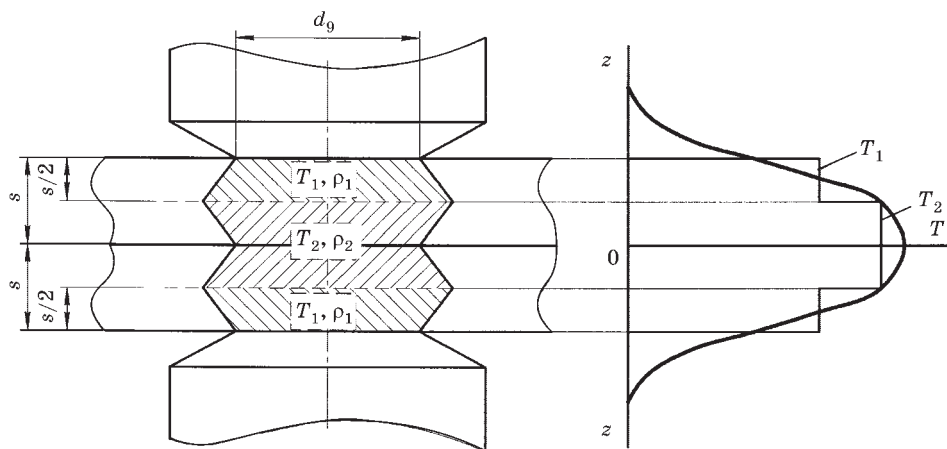


Рис. 9.11

Схема расчета электрического сопротивления деталей
к концу цикла сварки $r_{зс} = 2 \cdot r_{д.к}$:

d_s — диаметр рабочей поверхности электрода; s — толщина деталей; T_1 — температура полулиста, прилегающего к электроду; T_2 — температура полулиста, прилегающего к контакту деталь — деталь; ρ_1 — удельное электросопротивление материала деталей при температуре T_1 ; ρ_2 — удельное электросопротивление материала деталей при температуре T_2 .

Диаметр контактной поверхности электрода d_s берут в зависимости от толщины деталей (табл. 9.2) или определяют по выражениям: $d_s = 2s + 3$ мм для $s < 2$ мм и $d_s = 1,5s + 5$ мм для $s \geq 2$ мм.

Таким образом, рассматриваемое сопротивление $2r_{\text{д.к}}$ можно приближенно рассчитать как сумму сопротивлений двух условных пластин 1 и 2 одинаковой толщины, каждая из которых нагрета до некоторой средней температуры T_1 и T_2 (рис. 9.11б), по формуле

$$2r_{\text{д.к}} = Ak_p s(\rho_1 + \rho_2)/(\pi d_s^2 / 4). \tag{9.13}$$

Коэффициент A (рис. 9.10в) зависит от отношения d_s/s , для деталей толщиной 0,8–3 мм $A \approx 0,8$. Удельные электросопротивления металла деталей ρ_1 и ρ_2 определяют соответственно для температур T_1 и T_2 . При сварке деталей из низкоуглеродистых сталей T_1 и T_2 принимают равными соответственно 1200 и 1500°С, а для алюминиевых сплавов — 450 и 630°С. Коэффициент k_p учитывает неравномерность нагрева деталей. Для сталей k_p можно принять равным 0,85, а для алюминиевых и магниевых сплавов — 0,9.

Значения сопротивлений $2r_{\text{д.к}}$, рассчитанные по выражению 9.13, хорошо согласуются с экспериментальными данными (табл. 9.2).

Таблица 9.2

Сопротивление межэлектродной области ($r_{\text{ээ.к}} = 2r_{\text{д.к}}$) в конце процесса сварки в мкОм*

Металл	Точечная сварка, толщина в мм						Шовная сварка, толщина в мм				
	0,3	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	0,3	0,5	1,0	1,5	2,0
Д16АТ	18	16	13	11	10	8	—	14	11	10	18
Л62	76	48	30	24	20	18	46	29	18	15	12
08кп	150	135	115	100	90	75	110	95	80	70	50
30ХГСА	165	145	125	110	100	90	145	130	105	85	65
Х15Н5Д2Т	195	165	135	120	110	100	170	145	115	105	95
12Х18Н10Т	215	185	150	130	120	110	188	162	130	115	105
ОТ4-1	240	210	165	145	133	120	224	195	154	135	124

*Данные приведены для соединений с минимальными размерами d ядра для двух деталей одинаковой толщины.

Рассмотренное поле плотности тока в различных сечениях равномерно нагретых деталей без учета контактных сопротивлений при точечной сварке (рис. 9.12а) существенно отличается от аналогичных распределений при шовной и рельефной сварке (рис. 9.12б, в). Наибольшее отличие имеет место вблизи контакта между деталями (сечение III–III), т. е. в зоне зарождения литого ядра. Например, при шовной сварке распределение плотности тока между деталями в продольном сечении шва (сечение III–III) несимметрично вертикальной оси z . Наблюдаемое снижение плотности тока со стороны ранее сваренного участка шва является результатом шунтирования (растекания) тока в этот участок, т. е. за пределы столбика металла между электродами. Поэтому, при прочих равных условиях, собственное сопротивление деталей $2r_{\text{д.к}}$ при шовной сварке меньше по сравнению с точечной сваркой.

При рельефной сварке поле плотности тока в деталях также существенно отличается от аналогичного распределения для точечной сварки во всех рассматриваемых сечениях. В начальный момент сварки после приложения силы

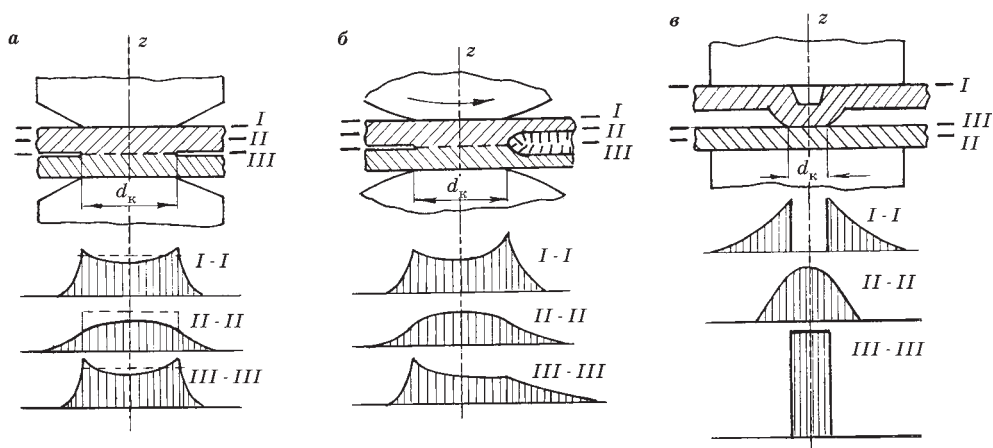


Рис. 9.12

Распределение плотности тока в различных сечениях деталей при точечной, шовной и рельефной сварке:

a — при точечной сварке; *б* — при шовной сварке; *в* — при рельефной сварке; d_k — диаметр контакта деталь — деталь; *I*, *II*, *III* — номера продольных сечений, в которых рассматривается плотность тока.

сжатия у вершины незначительно смятого рельефа наблюдается высокая плотность тока (сечение *III-III*). Собственное исходное сопротивление детали (сечение *II-II*) при этом велико из-за стягивания линий тока к площадке касания малого диаметра d_k .

Объемный характер поля плотности тока и сложная геометрия соединения при шовной и рельефной сварке не позволяют описать простыми зависимостями типа (9.13) собственное сопротивление деталей. Электрическое сопротивление деталей надо определять с учетом формы этой деталей с обязательным учетом геометрии пространства в них, охватываемого линиями тока.

Приведенное на рисунке 9.12 распределение плотностей тока для соединений различного типа получено на основе решения дифференциального уравнения Лапласа, описывающего (трехмерное) электрическое поле. Более подробно с методикой расчета можно познакомиться в специальной литературе, рекомендованной в учебном пособии.

9.2.4. ОБЩЕЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЗОНЫ СВАРКИ

До начала пропускания электрического тока общее сопротивление зоны сварки r_{Σ} определяется, в основном, сопротивлениями контактов $r_{\Sigma d}$ и $r_{\Sigma \text{дл}}$. Собственное сопротивление холодных деталей $2r_{\text{д}}$ относительно невелико. Наибольшее влияние на исходную величину r_{Σ} оказывают удельное электрическое сопротивление материалов деталей и оксидов на контактных поверхностях, сопротивление контактирующих материалов смятию при их сжатии и степень очистки контактных поверхностей от оксидов и загрязнений. Под действием приложенной к деталям силы сжатия, до момента включения тока, происходит упруго-пластическая деформация соприкасающихся микровыступов.

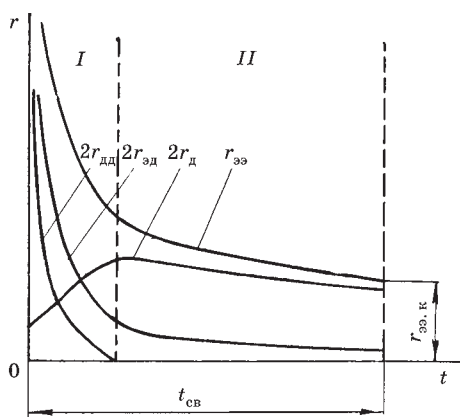


Рис. 9.13
Изменение сопротивлений
межэлектродной области при точечной
сварке:

$r_{эд}$, $r_{дд}$, $r_д$ — сопротивления электрод — деталь, деталь — деталь и собственно детали; $r_{эз}$ — общее сопротивление межэлектродной области; $r_{эз,к}$ — конечное электрическое сопротивление межэлектродной области; $t_{св}$ — время сварки; I, II — стадии формирования сопротивления.

ски до нуля, а $2r_{эд}$ до относительно малой величины. Собственное сопротивление деталей $2r_д$ при этом повышается за счет увеличения ρ . На второй стадии (II) $r_{эз}$ в основном определяется собственным сопротивлением деталей $2r_д$. Кинетика $r_{эз}$ в этот период времени определяется процессом формирования расплавленного ядра сварной точки и увеличением фактической площади контактов электрод — деталь и деталь — деталь. Действие этих факторов в сочетании с неравномерным температурным полем в деталях обуславливает непрерывное перераспределение плотности тока в объеме деталей. Однако решающую роль в кинетике $r_{эз}$ на второй стадии (II) оказывает металл литого ядра с удельным сопротивлением, характерным для температуры плавления, которое много выше, чем у твердого металла. Таким образом, в момент выключения тока общее конечное электрическое сопротивление зоны сварки $r_{эз,к}$ практически равно собственному сопротивлению деталей $2r_{д,к}$, т. е. $r_{эз,к} = 2r_{д,к}$ (рис. 9.13).

В общем случае кинетика изменения $r_{эз}$ и его величина в процессе сварки зависят не только от теплофизических свойств металла и состояния свариваемых поверхностей, но также от параметров режима сварки, толщины деталей, формы и размеров рабочей поверхности электродов и их материала. Эти технологические факторы оказывают непосредственное влияние на ход электрических и термодформационных процессов в межэлектродной области. Так например, из данных таблицы 9.2 следует, что сплавы с более низким удельным электросопротивлением (на основе меди и алюминия) имеют меньшую величину $r_{эз,к}$, чем стали и титановые сплавы. Заметно меньшее конечное значение $r_{эз,к}$ (табл. 9.2) для деталей большей толщины.

Деформация сопровождается увеличением площади фактического касания S_{ϕ} и частичным разрушением оксидных пленок в контактах электродов с деталями и между деталями. Следствием этих процессов является снижение и частичная стабилизация исходной величины контактного сопротивления межэлектродной области $r_{эз}$ (рис. 9.7).

При включении сварочного тока $r_{эз}$ очень сильно изменяется. В процессе точечной сварки кривая изменения $r_{эз}(t_{св})$ обычно имеет падающую характеристику (рис. 9.13).

На начальной стадии (I) действия тока происходит резкое снижение электрического сопротивления контактов в результате электрического пробоя сохранившихся оксидных пленок и уменьшения сопротивления смятию контактирующих металлов. При этом контактное сопротивление $r_{дд}$ снижается практиче-

Сопротивление $r_{\text{эз}}$ и $r_{\text{эз.к}}$ при точечной сварке уменьшаются также с увеличением $F_{\text{св}}$ и диаметра литого ядра $d_{\text{я}}$.

Анализ закономерностей изменения $r_{\text{эз}}$ при точечной сварке показывает, что основная доля теплоты (9.3), выделяется на собственном сопротивлении двух деталей $2r_{\text{д}}$. Доля теплоты, выделяемая на контактных сопротивлениях $r_{\text{эд}}$ и $r_{\text{дд}}$ не превышает 10% в общем тепловом балансе.

По изменению величины сопротивления $r_{\text{эз.к}}$ в момент выключения тока при сварке однотипных деталей можно судить о стабильности процесса тепловыделения. Для стабилизации тепловыделения и, соответственно, показателей качества сварной точки применяют технологические приемы, обеспечивающие снижение и стабилизацию всех составляющих общего электрического сопротивления зоны сварки $r_{\text{эз}}$ (см. п. 9.2.2).

При *рельефной сварке* кинетика изменения $r_{\text{эз}}$ существенно отличается от случая точечной сварки (рис. 9.14). При включении тока в начальный момент металл рельефа и сварочного контакта нагреваются в результате чего $r_{\text{эз}}$ возрастает. Затем при нагреве металла выше температуры разупрочнения начинается процесс смятия рельефа и $r_{\text{эз}}$ резко снижается. Стадия *I* заканчивается выдавливанием части нагретого металла рельефа в зазор между деталями. На стадии *II* снижение $r_{\text{эз}}$ замедляется в связи с расширением площади контактов. Стадия *II* заканчивается полной осадкой рельефа и формированием $d_{\text{к}}$, в пределах которого на стадии *III* образуется литое ядро. На стадии *III* $r_{\text{эз}}$ незначительно изменяется, также как и при точечной сварке. Величина $r_{\text{эз.к}}$ при рельефной сварке меньше, чем при точечной, за счет больших размеров контактов.

При *шовной сварке* вследствие достаточно высокой начальной температуры деталей и, соответственно, высокого сопротивления деталей $2r_{\text{д}}$, заметно снижается роль $r_{\text{дд}}$ и $2r_{\text{эд}}$ в кинетике изменения $r_{\text{эз}}$. Поэтому в начале цикла сварки не наблюдается резкого снижения $r_{\text{эз}}$, общее электрическое сопротивление монотонно уменьшается в цикле сварки вплоть до момента выключения тока. Конечные значения $r_{\text{эз.к}}$ из-за большой площади контактов заметно меньше, чем при точечной сварке (табл. 9.2). В то же время следует иметь в виду, что при шовной сварке сопротивление подвижного контакта электрод — деталь зависит от скорости сварки — с увеличением скорости это сопротивление заметно растет.

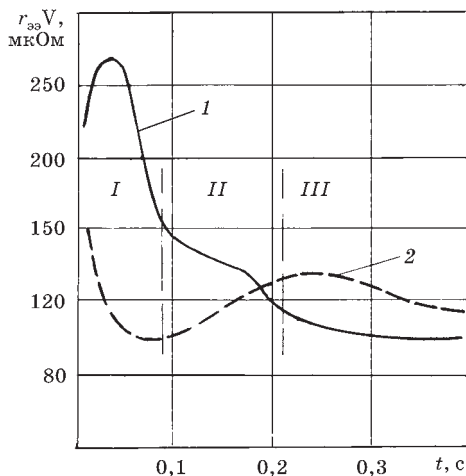


Рис. 9.14
Изменение сопротивления $r_{\text{эз}}$ в процессе рельефной (1) и точечной (2) сварки низкоуглеродистой стали толщиной 2 + 2 мм:

I, II, III — стадии формирования сопротивления при рельефной сварке.

9.2.5. НАГРЕВ МЕТАЛЛА В ЗОНЕ СВАРКИ

В процессе точечной, шовной и рельефной сварки нагрев металла в межэлектродной области вызван действием следующих внутренних источников или очагов тепловыделения.

1. Основное количество теплоты Q_d , которое выделяется в объеме деталей на их собственном сопротивлении $2r_d$, определяется по закону Джоуля — Ленца:

$$Q_d = \int_0^t i_{св}^2(t) r_d(t) dt. \quad (9.14)$$

От действия источника Q_d в межэлектродной области выделяется более 90% теплоты от общего ее количества $Q_{эз}$.

2. Теплота, выделяющаяся на электрических сопротивлениях в объеме микрошероховатостей, образующих контакты, рассчитывается по формуле

$$Q_{мг} = \int_0^t i_{св}^2(t) r_{мг}(t) dt. \quad (9.15)$$

$Q_{мг}$ обычно $< 10\%$ от $Q_{эз}$ в силу быстрого смятия микровыступов за время $\approx 0,1 t_{св}$.

3. Теплота, которая генерируется в контактах на естественных оксидных пленках или искусственных покрытиях (пассивирующие, фосфатные, цинковые, никелевые и другие покрытия) при их электротепловом пробое в начальный период сварки:

$$Q_{пл} = \int_0^t i_{св}^2(t) r_{пл}(t) dt, \quad (9.16)$$

где $r_{пл}$ — сопротивление пленки заданной толщины на контактной поверхности (9.7).

4. Теплота Пельтье — плоский источник, действующий в контакте двух разнородных материалов, например, электрод — деталь, или на границе жидкий металл — твердый, или на границе пленки оксида с металлом.

Этот эффект проявляется в выделении или поглощении теплоты в зависимости от направления тока через границу разнородных сред. Эффект Пельтье обусловлен тем, что средние величины кинетической энергии свободных электронов у разных металлов не одинаковы. Если направление тока таково, что через контакт переносятся электроны из металла, в котором их энергия больше, то избыток своей энергии они передают контакту, что проявляется в повышении температуры и падении напряжения в этом контакте и, наоборот, при изменении направления тока через контакт он будет охлаждаться.

Количество теплоты, выделяющейся или поглощаемой в результате действия эффекта Пельтье:

$$Q_{пт} = \pm \Pi \int_0^t i_{св}(t) dt, \quad (9.17)$$

где Π — коэффициент Пельтье. Для границы разнородных металлов $\Pi = \alpha \theta$, где α — коэффициент термоэлектродвижущей силы; θ — абсолютная температура границы металлов.

Теплота Пельтье в зависимости от направления тока складывается с джоулевой теплотой или вычитается из нее. Поэтому при сварке на переменном токе теплота Пельтье не проявляется, поскольку при одном направлении тока она положительна, а при другом — отрицательна. Расчеты показывают, что теплота Пельтье может составлять $\pm(3...5)\%$ от теплоты Q_d . При сварке на постоянном токе или униполярным импульсом тока действие этого дополнительного источника таково, что в целом в межэлектродной области тепловыделение будет несимметричным относительно плоскости контакта свариваемых деталей.

Таким образом, общее количество теплоты, генерируемое в межэлектродной области при протекании тока, можно определить как сумму количеств теплоты:

$$Q_{\Sigma} = Q_d + Q_{mg} + Q_{pl} \pm Q_{pt}. \quad (9.18)$$

Поскольку основным источником теплоты при точечной, рельефной и шовной сварке является теплота Q_d , определяемая полем плотности тока в объеме деталей (рис. 9.12), то при приближенных технологических расчетах действием контактных источников Q_{mg} , Q_{pl} и Q_{pt} пренебрегают. С учетом этого допущения общее количество теплоты, выделяющееся в зоне сварки Q_{Σ} определяют к концу процесса как теплоту Q_d , генерируемую только в свариваемых деталях. Следовательно, при усреднении по температуре и времени членов, входящих в зависимость (9.14), можно выражение (9.18) преобразовать к виду

$$Q_{\Sigma} = m_r I_{св}^2 (2r_{д.к}) t_{св}, \quad (9.19)$$

где m_r — коэффициент, который учитывает изменение сопротивления зоны сварки в процессе нагрева и зависящий от свойств свариваемого металла (для низкоуглеродистых сталей m_r принимают равным 1,0; для алюминиевых и магниевых сплавов — 1,15; для коррозионно-стойких сталей — 1,2; сплавов титана — 1,4); $2r_{д.к}$ — электрическое сопротивление деталей в конце сварки (определение $2r_{д.к}$ см. в п. 9.2.3).

Рассмотрим теперь общую тепловую картину в межэлектродной области при точечной сварке деталей равной толщины.

Распространение теплоты в неравномерно нагретом твердом теле определяется законами теплопередачи и зависит от следующих теплофизических свойств материала (табл. 9.1): коэффициента теплопроводности λ , удельной теплоемкости c и плотности γ . Чем выше теплопроводность, характеризующая интенсивность теплового потока в неравномерно нагретом теле, и коэффициент температуропроводности [$a = \lambda / (c\gamma)$], определяющий скорость выравнивания температуры в этом теле, тем быстрее распространяется в свариваемых деталях тепло и тем шире зона нагрева деталей при сварке. С увеличением λ и a растут необходимые для сварки мощность и расход электроэнергии. Теплофизические свойства зависят от температуры. Характер этой зависимости определяется типом кристаллической решетки и системой легирования сплава.

В результате одновременно протекающих процессов тепловыделения и теплопередачи при сварке электродами с контактной поверхностью в виде круга в деталях равной толщины формируется *температурное поле*, симметричное

относительно оси электродов [$T = f(r, z)$]. В этом случае температурное поле описывается изотермами, которые представляют собой тела вращения с осью z (рис. 9.15).

Температурное поле не является стационарным и однородным в межэлектродной области. Спустя некоторое время с начала включения тока (0,3...0,5) $t_{\text{св}}$, в зоне контакта деталь — деталь начинается плавление металла. В процессе сварки эта зона остается наиболее нагретым местом не только потому, что в нем наибольшая плотность тока (рис. 9.12) и электрическое сопротивление, но и потому, что это место наиболее удалено от охлажденных электродов. По мере прохождения тока ядро расплавленного металла, ограниченное изотермой плавления, растет до номинальных размеров в направлении осей z и r . К концу точечной сварки температурное поле имеет вид, схематически показанный на рисунке 9.15. Максимальная температура в ядре обычно на 15–20% превышает температуру ликвидуса сплава.

От границы ядра температура быстро падает вдоль оси z из-за интенсивного теплоотвода в электроды. Максимальное значение температуры в контакте электрод — деталь обычно не превосходит (0,4...0,6) $T_{\text{пл}}$. Вдоль оси r температура также быстро снижается. Чем выше температуропроводность свариваемого материала, тем медленнее это снижение и меньше температурный градиент. Градиенты температур могут достигать по оси z более 100 000°C/см особенно при сварке сталей малой толщины. На рисунке 9.15 показано распределение температуры в осевом и радиальном направлениях при сварке алюминиевого сплава с высокой температуропроводностью (1) и стали с низкой (2).

После выключения тока металл в зоне сварки охлаждается со скоростями, соизмеримыми со скоростями нагрева. Расчеты показывают, что для деталей

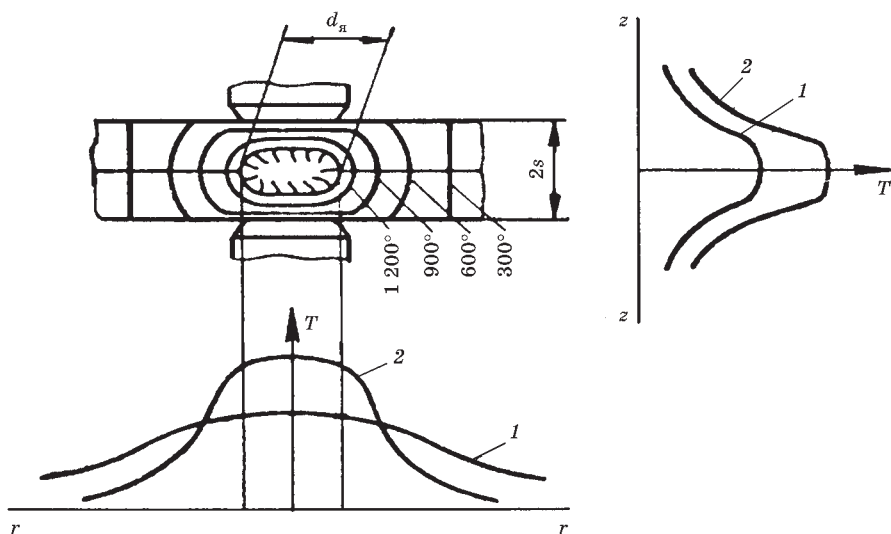


Рис. 9.15

Распределение температуры в осевом и радиальном направлениях при точечной сварке: 1 — температурное поле материала с высокой температуропроводностью; 2 — температурное поле материала с низкой температуропроводностью; d_n — диаметр ядра; s — толщина деталей.

толщиной 1...4 мм ядро полностью кристаллизуется через 0,02...0,08 с. За это время часть теплоты распространяется вглубь деталей, нагревая околошовную зону.

Наиболее точную картину формирования температурного поля можно получить по результатам математического моделирования процесса точечной сварки на ЭВМ. В этом случае осуществляют совместное решение дифференциального уравнения Лапласа (9.11), описывающего электрическое поле, и дифференциального уравнения теплопроводности Фурье, которое при условии, что теплоемкость и плотность металла не зависят от температуры, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c\gamma} \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda \frac{\partial T}{r \partial r} \right] + \frac{j^2 \rho}{c\gamma}, \quad (9.20)$$

где c , γ , λ и ρ — соответственно массовая теплоемкость, плотность, коэффициент теплопроводности и удельное электросопротивление металла; j — плотность тока.

В левой части уравнения — скорость изменения температуры в любой точке межэлектродной области, в правой — сумма частных производных, учитывающих теплообмен внутри детали за счет теплопроводности. Слагаемое $j^2 \rho / c\gamma$ выражает повышение температуры от действия джоулевого источника теплоты, связанного с прохождением тока плотностью j через собственное сопротивление деталей.

Эти уравнения (9.11) и (9.20) решаются численными методами — методом конечных разностей и методом конечных элементов, что позволяет учесть

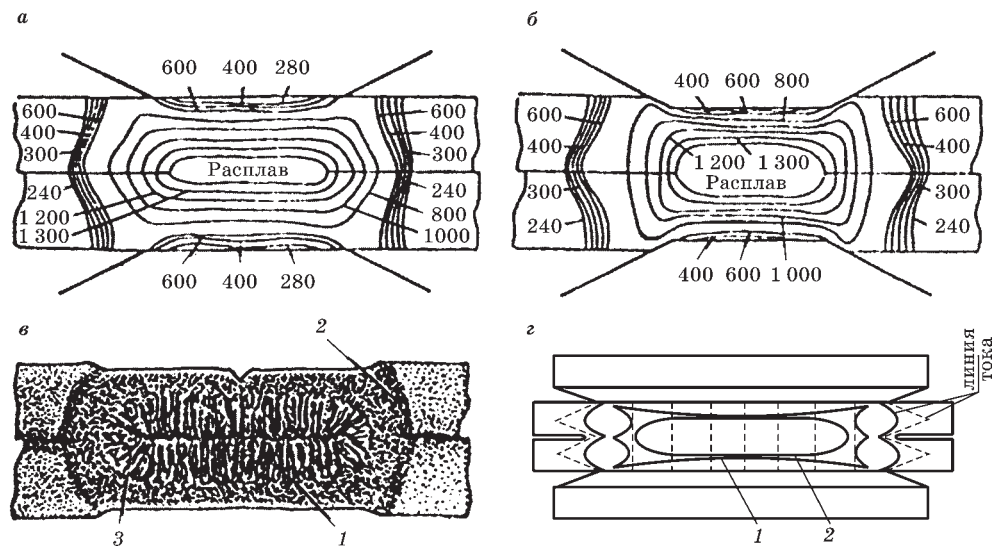


Рис. 9.16

Изменение температурного поля в процессе сварки деталей из низкоуглеродистой стали толщиной 1,5 + 1,5 мм и макроструктура ядра точки:

a — расчетные изотермы для $t = 0,08$ с; $б$ — расчетные изотермы для $t = 0,12$ с; $в$ — макроструктура сварной точки: 1 — изотерма плавления, 2 — зона термического воздействия, 3 — линия сплавления; $г$ — форма ядра при сварке на жестких (1) и мягких (2) режимах.

зависимость теплофизических свойств металлов от температуры, скрытую теплоту плавления металла, геометрические размеры соединения и их изменения в результате действия температуры и силы сжатия.

Математическое моделирование по данной методике наиболее точно отражает кинетику формирования температурного поля в зоне сварки. Так, расчетные изотермы температуры плавления (рис. 9.16а, б) по форме и размерам соответствуют границам расплавленного ядра, определяемым по макрошлифам сварных точек (рис. 9.16в).

9.2.6. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС В МЕЖЭЛЕКТРОДНОЙ ОБЛАСТИ И РАСЧЕТ СВАРОЧНОГО ТОКА

Теплота $Q_{\text{эз}}$, которая должна выделяться при сварке, расходуется на формирования ядра, т. е. полезный нагрев деталей ($Q_{\text{пол}}$), и на компенсацию тепловых потерь в окружающую зону сварки металл деталей Q_1 , в электроды Q_2 и в атмосферу Q_3 . Количество выделенной и израсходованной теплоты равны между собой, что выражается уравнением теплового баланса:

$$Q_{\text{эз}} = Q_{\text{пол}} + Q_1 + Q_2 + Q_3. \quad (9.21)$$

Для определения составляющих уравнения теплового баланса, например при точечной сварке, используют условную схему тепловых потоков и распределение температуры в зоне сварки (рис. 9.17).

В представленной методике расчета допускают, что вся энергия генерируется в центральном столбике металла диаметром d_s и высотой $2s$, зажатом между электродами. Часть этой энергии расходуется на полезный нагрев и плавление $Q_{\text{пол}}$ неравномерно нагретого центрального столбика. С учетом скрытой теплоты плавления среднюю расчетную температуру нагрева столбика принимают равной $T_{\text{пл}}$, тогда

$$Q_{\text{пол}} = GcT_{\text{пл}} = \frac{\rho d_s^2}{4} 2s\gamma_m c_m T_{\text{пл}}, \quad (9.22)$$

где G — масса столбика металла; c_m — средняя удельная теплоемкость; γ_m — плотность металла свариваемых деталей.

Тепловые потери Q_1 учитывают через нагрев деталей за пределами столбика в виде кольца шириной x_1 до средней температуры, равной $0,25T_{\text{пл}}$. Значение x_1 (рис. 9.17) зависит от продолжительности нагрева $t_{\text{св}}$ и температуропроводности a_m свариваемого материала:

$$x_1 = 4\sqrt{a_m t_{\text{св}}} \quad (9.23)$$

Тогда теплота Q_1 при сварке двух деталей толщиной s ориентировочно равна:

$$Q_1 = k_1 \pi x_1 (d_s + x_1) 2sc_m \gamma_m \frac{T_{\text{пл}}}{4}, \quad (9.24)$$

где $\pi x_1 (d_s + x_1) 2s$ — объем условного кольца; k_1 — коэффициент, близкий к 0,8, учитывает, что средняя температура кольца несколько ниже средней температуры $0,25 T_{\text{пл}}$ из-за неравномерности нагрева по объему кольца.

Потери теплоты в электроды Q_2 определяют аналогичным образом, принимая температуру на их контактной поверхности $T_s = 0,5 T_{\text{пл}}$ (рис. 9.17). Тогда

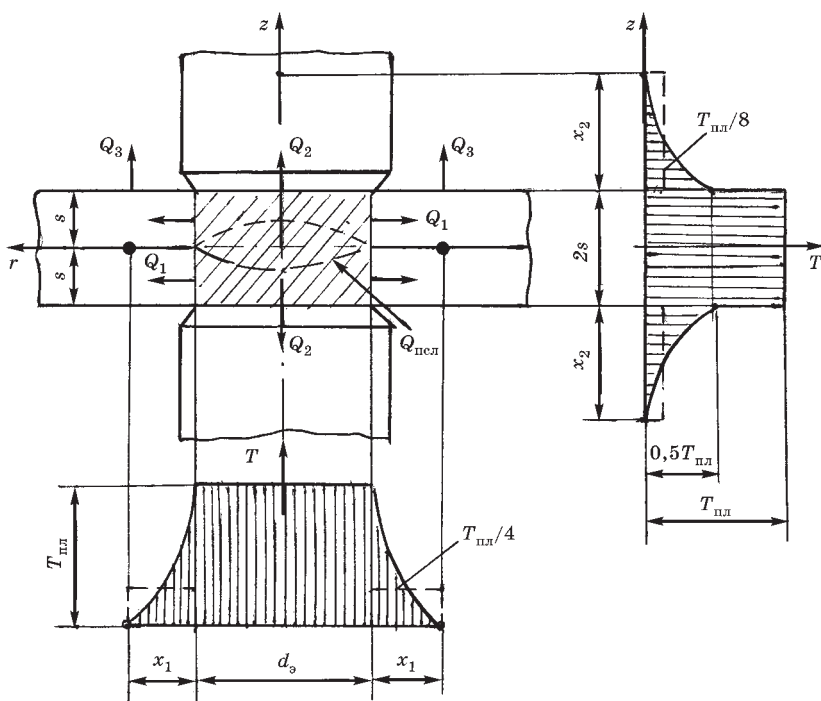


Рис. 9.17

Схема тепловых потоков в зоне сварки и распределение в ней температуры для расчета теплового баланса:

$d_э$ — диаметр центрального столбика металла; s — толщина деталей; x_1 — ширина кольца со средней температурой $0,25 T_{пл}$; x_2 — высота условного цилиндра со средней температурой $T_{пл}/8$; T — температура; $Q_{пол}$ — теплота, идущая на полезный нагрев деталей; Q_1 — потери теплоты, идущие на нагрев кольца; Q_2 — потери теплоты в электроды; Q_3 — потери теплоты в атмосферу.

за счет теплопроводности нагревается участок электрода длиной $x_2 = 4\sqrt{a_э t_{св}}$ и объемом $k_2 = \pi d_э^2 x_2 / 4$ до средней температуры $T_{пл}/8$. Коэффициент k_2 учитывает влияние на теплоотвод формы рабочей части электродов: для цилиндрического электрода диаметром $d_э$ коэффициент $k_2 = 1$, для электрода с плоско-конической поверхностью $k_2 = 1,5$, для электрода со сферической поверхностью $k_2 = 2$. Тогда

$$Q_2 = 2k_2 \frac{\pi d_э^2}{4} x_2 c_э \gamma_э \frac{T_{пл}}{8}, \quad (9.25)$$

где $c_э$ и $\gamma_э$ — теплоемкость и плотность металла электрода.

Для электродов со сферической контактной поверхностью в расчетах вместо $d_э$ следует принимать заданный диаметр ядра точки d .

Тепловыми потерями Q_3 в атмосферу за счет радиационной и конвективной теплоотдачи можно пренебречь ввиду их малости, и тогда уравнение (9.21) в развернутом виде:

$$Q_{эз} = \frac{\pi d_э^2}{4} 2s \gamma_м c_м T_{пл} + k_1 \pi x_1 (d_э + x_1) 2s c_м \gamma_м \frac{T_{пл}}{4} + 2k_2 \frac{\pi d_э^4}{4} x_2 c_э \gamma_э \frac{T_{пл}}{8}. \quad (9.26)$$

Усредненную силу сварочного тока $I_{\text{св}}$ рассчитывают с учетом ранее сделанного допущения о том, что $Q_{\text{эз}}$ выделяется только в свариваемых деталях — по зависимости, которая получена из закона Джоуля — Ленца (9.19):

$$I_{\text{св}} = \sqrt{\frac{Q_{\text{эз}}}{m_r (2r_{\text{д.к}}) t_{\text{св}}}}. \quad (9.27)$$

$Q_{\text{эз}}$ определяют по уравнению теплового баланса (9.26), предварительно задавшись технологически целесообразной длительностью сварки $t_{\text{св}}$ (см. гл. 11). Электрическое сопротивление деталей в конце сварки $2r_{\text{д.к}}$ определяют по формулам (9.13) или табличным данным (табл. 9.2); коэффициент m_r , учитывающий изменение сопротивления в процессе сварки, для различных групп материалов, указан в п. 9.2.5.

Поскольку при выводе формул (9.19) и (9.26) был сделан ряд допущений, необходимо расчетный ток откорректировать по результатам опытных сварок. При этом силу сварочного тока изменяют так, чтобы получить литое ядро номинальных размеров в соответствии с ГОСТ 15878-79.

Анализ уравнения теплового баланса (9.26) и выполненные по нему расчеты показывают, что количество теплоты $Q_{\text{пол}}$, идущее на нагрев и плавление металла при сварке стали может достигать 30% от $Q_{\text{эз}}$ (при сварке алюминиевых сплавов 5...10% от $Q_{\text{эз}}$). Тепловые потери Q_1 в массу свариваемых деталей составляют около 20% от $Q_{\text{эз}}$, особенно велики потери теплоты в электроды, которые составляют не менее 30...50% от $Q_{\text{эз}}$.

Из формулы (9.22) видно, что теплота $Q_{\text{пол}}$, необходимая для образования сварной точки, практически не зависит от продолжительности нагрева и определяется массой и теплофизическими свойствами нагретого металла.

Потери теплоты в металл Q_1 и в электроды Q_2 зависят от времени сварки $t_{\text{св}}$; с его увеличением растут x_1 и x_2 . Поэтому общее количество теплоты $Q_{\text{эз}}$, необходимое для сварки, всегда растет с удлинением $t_{\text{св}}$ (рис. 9.18а).

Среднее количество теплоты q , выделяемое в межэлектродной области за единицу времени и определяющее мощность, расходуемую в ней:

$$q = \frac{Q_{\text{эз}}}{t_{\text{св}}}. \quad (9.28)$$

Эта величина определяет скорость нагрева зоны сварки. При большой мощности q_1 (рис. 9.18б) время нагрева t_1 до температуры сварки $T_{\text{св}}$ не велико. С уменьшением мощности (например, до q_2) время нагрева до $T_{\text{св}}$ увеличивается ($t_2 > t_1$).

Следовательно, мощность, необходимая для контактной сварки заданных деталей, не является постоянной величиной. Она уменьшается с увеличением $t_{\text{св}}$, но всегда должна быть существенно большей $q_{3\text{ min}}$, иначе нагреть детали до $T_{\text{св}}$ вообще невозможно.

Таким образом, термический цикл сварки на стадии нагрева (рис. 9.18б) в значительной степени зависит от потребляемой мощности.

Как следует из уравнения Джоуля — Ленца (9.19), одинаковое количество теплоты $Q_{\text{эз}}$ может быть выделено при различных значениях (сочетаниях) параметров режима $I_{\text{св}}$ и $t_{\text{св}}$. Режимы сварки с относительно большим $I_{\text{св}}$

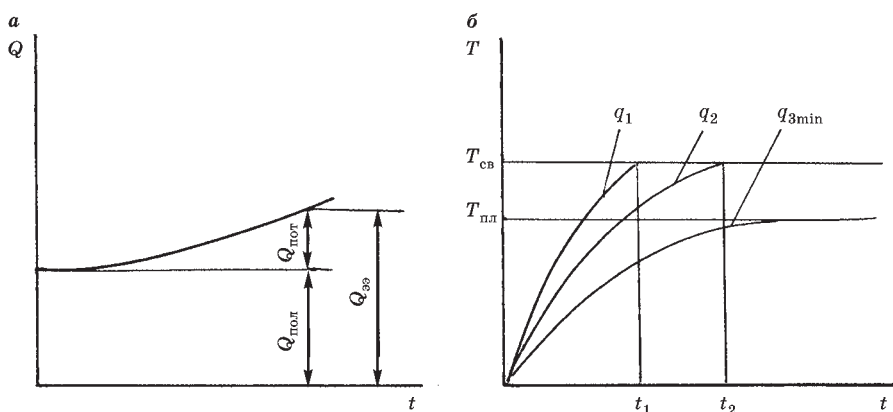


Рис. 9.18

Типовые зависимости от продолжительности нагрева:

a — необходимой для сварки теплоты; *б* — температуры в зоне сварки; $Q_{\text{поз}}$ — теплота, идущая на полезный нагрев деталей; $Q_{\text{пот}}$ — суммарные потери теплоты в металл, электроды и в атмосферу; $Q_{\text{св}}$ — теплота, выделяющаяся в межэлектродной области; $T_{\text{св}}$ — температура, необходимая для завершения сварки; $T_{\text{пл}}$ — температура плавления; q — средняя мощность, потребляемая в межэлектродной области ($q_1 > q_2 > q_{3\text{min}}$); t_1 — время нагрева ($t_1 < t_2$).

и малым $t_{\text{св}}$ принято называть *жесткими*, а режимы с малым $I_{\text{св}}$ и большим $t_{\text{св}}$ — *мягкими*.

Изменение жесткости режима приводит к изменению характера формирования соединения и вида температурного поля, которое определяется, как отмечалось ранее, одновременно протекающими процессами тепловыделения и теплоотвода. С изменением времени сварки влияние тепловыделения и теплопередачи на процесс формирования соединения меняется.

Жесткий режим характеризуется кратковременным мощным импульсом тока. Чем меньше $t_{\text{св}}$, тем в большей степени температурное поле определяется тепловыделением, т. е. распределением плотности тока в деталях. В этом случае изотерма температуры плавления имеет форму, близкую к прямоугольнику (рис. 9.16 α). В результате уменьшения роли теплоотвода ($Q_2 + Q_3 \leq 20\% Q_{\text{св}}$) на жестких режимах увеличивается проплавление деталей, снижается протяженность зоны термического воздействия в деталях и, как следствие, уменьшается глубина вмятин на поверхности деталей. Высокая скорость нагрева при жестком режиме увеличивает склонность процесса к образованию выплесков. Очевидно, что, чем жестче режим сварки, тем относительно меньше зона разогрева деталей и тем труднее их пластически деформировать для формирования уплотнительного пояса, удерживающего расплавленный металл от выплеска. Поэтому при контактной сварке на жестких режимах применяют силу сжатия $F_{\text{сж}}$ большую, чем на мягких режимах.

Следует отметить, что с повышением $F_{\text{сж}}$ наблюдается падение всех составляющих $r_{\text{св}}$, рост площади контактов и снижение в них плотности тока, что приводит к уменьшению тепловыделения в деталях. Снижается также и вклад контактных источников $Q_{\text{мг}}$ и $Q_{\text{пл}}$ (9.15) и (9.16) в общее количество теплоты, генерируемой в межэлектродной области. Это снижение обусловлено

уменьшением $r_{\text{мг}}$ и $r_{\text{пл}}$ из-за дополнительного смятия микровыступов и дробления оксидов на контактных поверхностях под действием $F_{\text{сж}}$.

Растут также и потери теплоты в электроды в результате снижения термических сопротивлений контактов электрод — деталь.

Такое изменение составляющих общего количества теплоты, генерируемой в межэлектродной области, с повышением $F_{\text{сж}}$ приведет в целом к смягчению режима сварки и уменьшению размеров ядра.

Мягкий режим характеризуется значительной длительностью протекания тока относительно малой силы. С увеличением $t_{\text{св}}$ влияние поля плотности тока на температурное поле снижается, все большую роль играют процессы теплоотвода в металл деталей и в электроды ($Q_2 + Q_3 \geq 80\% Q_{\text{вз}}$). Изотерма температуры плавления (ликвидуса) имеет форму овала или эллипса (рис. 9.16з), расположенную в области, равноудаленной от рабочих поверхностей электродов. Скорости нагрева и охлаждения, а также величина $F_{\text{сж}}$ — меньшие, чем на жестких режимах. В связи с большим $t_{\text{св}}$ размеры пластического пояска и зоны термического воздействия на мягком режиме также больше и, следовательно, выше тепловые деформации металла и коробление сварных узлов.

Жесткость режима не может характеризоваться только одной длительностью $t_{\text{св}}$, она зависит также от толщины деталей и температуропроводности $a_{\text{м}}$ свариваемого материала. В качестве численного показателя жесткости режима для геометрически подобных сварных соединений удобно применять предложенную А. С. Гельманом величину, обратную критерию Фурье:

$$K = s / (a_{\text{м}} \cdot t_{\text{св}}) \quad (9.29)$$

где s — толщина свариваемых деталей; $a_{\text{м}}$ — коэффициент температуропроводности материала.

С помощью критерия K можно производить ориентировочную оценку и сравнение жесткости применяемых на практике режимов. Критерий K позволяет достаточно объективно оценить жесткость режима сварки деталей равного сочетания толщин для разных марок металла при условии равенства размеров литого ядра.

С технологических позиций на стадии нагрева жесткость режима в основном определяет форму и размеры литого ядра, а также вероятность выплеска металла в зазор между деталями в результате расплавления микровыступов или прорыва жидкого металла ядра через уплотнительный поясok. Поэтому к предельно мягким можно отнести режимы, при которых обеспечиваются минимально требуемые (по ГОСТ 15878-79) размеры сварной точки, а к предельно жестким, — когда возникают выплески.

После выключения сварочного тока происходит охлаждение и кристаллизация литого ядра. Скорость охлаждения зависит от жесткости режима сварки. При сварке на жестких режимах растет скорость охлаждения и уменьшается время пребывания металла в высокотемпературной области. Эти факторы определяют структуру и свойства металла литого ядра и околошовной зоны. Например, при сварке стали важно, чтобы предельная скорость охлаждения в интервале температур распада аустенита не вызывала недопустимой закалки.

Таким образом, температурное поле в зоне сварки определяет структуру, форму и размеры литого ядра. Очевидно, что температурное поле зависит от ряда параметров режима сварки: рода (переменный или постоянный) сварочного тока и его силы $I_{св}$, времени сварки $t_{св}$, силы сжатия $F_{сж}$, а также от формы и размеров рабочих поверхностей электродов, их материала и др. Увеличение $I_{св}$ и $t_{св}$ приводит к повышению тепловыделения и росту размеров ядра (рис. 9.19). При сварке импульсами постоянного тока (униполярными) обеспечивается непрерывный рост температуры, более высокая эффективность нагрева и большие размеры литого ядра, чем при импульсах переменного тока. С повышением $F_{сж}$ уменьшаются контактные и собственное сопротивление деталей и снижается плотность тока в них. Растут также и потери теплоты в электроды, что в целом приводит к уменьшению размеров ядра (рис. 9.19). Размеры электродов и свойства электродных материалов также существенно влияют на характер температурного поля. При сварке электродами со сферической рабочей поверхностью обеспечивается более интенсивный нагрев, чем электродами с плоской поверхностью. Повышение удельного электросопротивления материала электродов и соответствующее снижение их теплопроводности приводит как к повышению температуры в контактах электрод — деталь, так и к уменьшению теплоотвода в электроды. В результате наблюдается рост высоты ядра.

Шунтирование тока является одним из факторов, влияющих на температурное поле при точечной, рельефной и шовной сварке. Шунтирование тока проявляется в протекании части вторичного тока I_2 вне зоны сварки, например, через ранее сваренные точки $I_{ш}$ (рис. 9.20) при двухстороннем токоподводе или через одну из деталей при одностороннем токоподводе (рис. 11.3г, д, е) или случайные контакты между деталями. Наличие тока шунтирования влияет на поле плотности и силу тока $I_{св}$ в зоне сварки, что при малом расстоянии между точками $t_{ш}$ может привести к искажению формы и уменьшению размеров литого ядра.

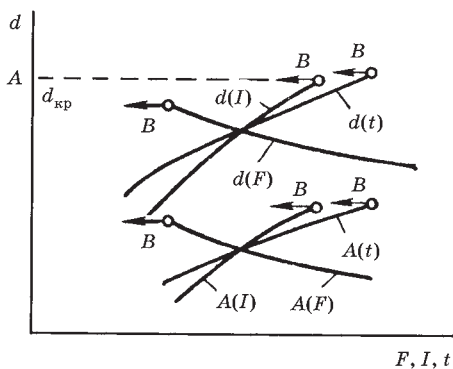


Рис. 9.19

Характер зависимости диаметра ядра d и проплавления A от параметров режима сварки:

B — конечный выплеск; F, I, t — сила сжатия, сварочный ток и время сварки; $d_{кр}$ — критический диаметр ядра, при котором возникает конечный выплеск.

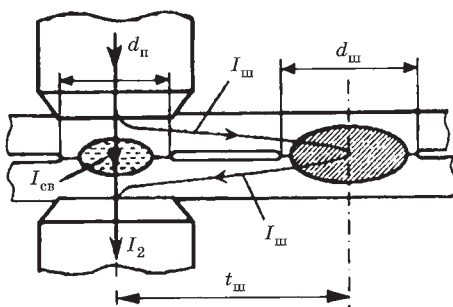


Рис. 9.20

Схема шунтирования тока через ранее сваренную точку:

$I_{св}$ и $I_{ш}$ — сварочный ток и ток шунтирования; $I_2 = I_{св} + I_{ш}$ — вторичный ток; $t_{ш}$ — шаг между точками; $d_п$ — диаметр уплотняющего пояса; $d_ш$ — диаметр шунтирующего контакта.

По закону Ома для разветвленной цепи без учета индуктивности цепи шунтирования значение тока шунтирования и других токов можно оценить по формулам

$$I_{\text{ш}} \neq I_{\text{св}} r_{\text{э}} / r_{\text{ш}}; \quad I_2 = I_{\text{св}} + I_{\text{ш}}; \quad I_{\text{св}} = I_2 / (1 + r_{\text{э}} / r_{\text{ш}}), \quad (9.30)$$

где $r_{\text{э}}, r_{\text{ш}}$ — электрическое сопротивление межэлектродной области и шунта соответственно, $r_{\text{ш}} = k_{\text{э}} 2\rho t_{\text{ш}} / (sb_{\text{пр}})$, в которой $b_{\text{пр}}$ — приведенная с учетом растекания тока ширина шунта, равная $(d_{\text{п}} + d_{\text{ш}}) / 2$; $d_{\text{п}}, d_{\text{ш}}$ — диаметры уплотняющего пояса и шунтирующего контакта соответственно; $k_{\text{э}} \approx 0,4$.

Из формул (9.30) следует, что малое сопротивление шунта $r_{\text{ш}}$ может значительно снизить $I_{\text{св}}$ и, соответственно, качество точки. Сопротивление шунта $r_{\text{ш}}$ меньше у металлов с низким удельным электросопротивлением ρ , оно падает при уменьшении шага точек $t_{\text{ш}}$ и увеличении толщины деталей s . Поэтому минимальный шаг сварных точек, приведенный в ГОСТ 15878-79, выбран так, что если $t_{\text{ш}} > t_{\text{ш min}}$, то $I_{\text{ш}} \leq 0,05 I_{\text{св}}$, и тогда шунтирование тока практически не влияет на размеры ядра и прочность точек.

В процессе сварки ток шунтирования обычно снижается из-за повышения $r_{\text{ш}}$ в результате нагрева и снижения $r_{\text{э}}$. При шовной сварке герметичным швом из-за повышенной температуры предыдущей точки ток шунтирования относительно не велик. Как правило, ток I_2 при шовной сварке на 20–50% выше, чем при точечной сварке аналогичных деталей.

9.3. ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ МЕТАЛЛА ПРИ СВАРКЕ

Пластическая деформация металла вызывается силой сжатия со стороны электродов и внутренними напряжениями, возникающими при несвободном расширении металла при нагреве. Пластическая деформация (течение) металла происходит на протяжении всего процесса сварки, начиная от формирования механического и электрического контактов до проковки соединения при его охлаждении.

Пластическая деформация металла в плоскости контактов напрямую связана с процессом нагрева, так как она определяет площадь этих контактов и их электрическое и термическое сопротивления. При охлаждении металла межэлектродной области и его кристаллизации в ядре происходит уменьшение объема (усадка) металла и возникновение поля остаточных растягивающих напряжений. Это часто является причиной образования несплошностей в литом металле сварного шва: наружных и внутренних трещин, раковин и рыхлот. Основным способом предупреждения образования и устранения указанных дефектов является применение ковочной силы.

В зависимости от объема деформируемого металла различают *микропластическую деформацию* рельефа поверхности контактов и *объемную пластическую деформацию* значительных масс металла межэлектродной области. Основная роль пластической деформации заключается в формировании электрического контакта, образовании пластического пояса для удержания расплавленного металла от выплеска, уплотнении металла на стадии охлаждения,

удалении оксидных пленок и в образовании металлических связей при рельефной и стыковой сварке.

Микропластическая деформация в объеме микронеровностей и шероховатостей контактов электрод — деталь и деталь — деталь происходит в основном во время протекания I этапа формирования соединения до начала появления первых очагов плавления. Микропластическая деформация на контактах развивается под действием приложенной силы сжатия на фоне снижения сопротивления пластической деформации и твердости нагреваемого металла микровыступов. В результате в межэлектродной области происходит резкое снижение контактных сопротивлений $r_{эд}$ и $r_{дд}$ (рис. 9.13). Ранее отмечалось, что при обычных циклах точечной сварки электродами с плоской рабочей поверхностью формирование механического и электрического контакта происходит за время $(0,1...0,2) t_{св}$. При сварке электродами со сферической рабочей поверхностью, а также при рельефной сварке микропластическая деформация продолжается на периферии непрерывно формирующихся контурных площадок и на II этапе формирования соединения.

Объемная пластическая деформация при точечной сварке вызывается внешней силой сжатия $F_{сж}$ ($F_{св}$) и внутренними напряжениями от теплового расширения металла. Известно, что при нагреве металлических тел происходит увеличение их линейных размеров и объема (дилатометрический эффект). В частности, при температуре T твердого тела его длина l_T и объем V_T равны соответственно

$$l_T = l_0(1 + \alpha_l T) \text{ и } V_T = V_0(1 + \beta_V T), \quad (9.31)$$

где l_0 и V_0 — длина и объем тела при $T = 0$; α_l и β_V — термические коэффициенты линейного и объемного расширения ($\beta_V \approx 3\alpha_l$).

Рассмотрим качественную картину деформации металла в межэлектродной области.

На начальном этапе нагрева происходит температурное расширение металла и увеличение его объема V_d (рис. 9.21а). Температурное расширение происходит в радиальном, окружном и осевом направлениях. Степень расширения по трем направлениям неодинакова. При точечной сварке увеличение толщины и объема деталей происходит преимущественно в направлении оси z (рис. 9.21а), где действует сжимающая сила $F_{св}$ со стороны электродов. Возрастанию объема в окружном и радиальном направлении вдоль оси r препятствует более холодный соседний металл. Возникающие при этом силы со стороны холодного металла (показаны темными стрелками) сжимают нагреваемый металл. В результате действия этих сил в межэлектродной области объемом V_d возникают временные сжимающие радиальные, окружные и осевые напряжения, приводящие к упругим, а затем пластическим деформациям металла.

Вследствие теплового расширения наблюдается незначительное перемещение (раздвигание) электродов на расстояние, равное 3...4% от толщины деталей, и увеличение зазора между деталями за периметром контакта деталь — деталь. Одновременно из-за повышения температуры растет пластичность слоев металла, прилегающих к контакту. Когда температура этих слоев достигнет температуры рекристаллизации $(0,25...0,3 T_{пл} \text{ К})$, начинается снижение предела текучести свариваемого металла σ_T . В этот момент достигается условие

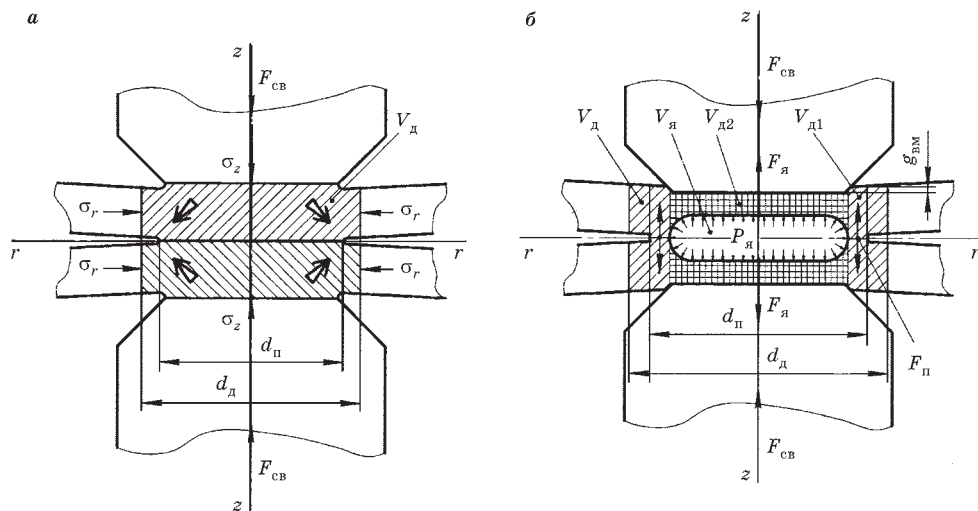


Рис. 9.21

Пластическая деформация металла в зоне формирования точечного соединения:

a — начальный этап нагрева; *б* — последующий нагрев с образованием расплавленного ядра; $d_{\text{п}}$ — диаметр уплотняющего пояска; $d_{\text{д}}$ — диаметр упруго-пластически деформируемого объема металла $V_{\text{д}}$; $V_{\text{д}}$ и $V_{\text{д1}}$ — упруго-пластически деформируемые объемы металла, $V_{\text{д2}}$ — объем металла, расположенный над ядром; $V_{\text{я}}$ — объем ядра; $g_{\text{вм}}$ — глубина вмятины, $p_{\text{я}}$ — гидростатическое давление внутри ядра; $F_{\text{я}}$ — сила со стороны жидкого металла ядра; $F_{\text{п}}$ — сила со стороны уплотняющего пояска; $F_{\text{св}}$ — сила сжатия деталей; σ_z и σ_r — временные сжимающие осевые и радиальные напряжения.

текучести, когда σ_T нагретых слоев металла становится равным интенсивности напряжений σ_i ($\sigma_T = \sigma_i$). В результате происходит пластическое течение при- контактных слоев металла в зазор и формирование плотной зоны (уплотняющего пояска диаметром $d_{\text{п}}$), в пределах которой в дальнейшем образуется литое ядро. Начинается также процесс незначительного внедрения электродов в поверхность деталей, при этом $g_{\text{вм}}$ достигает лишь 0,2–0,3% от толщины детали.

Образование уплотняющего пояска ограничивает растекание сварочного тока и обеспечивает защиту металла при его расплавлении от контакта с атмосферой и от выплеска в зазор между деталями.

На втором этапе формирования соединения происходит дальнейшее повышение температуры и резкое снижение предела текучести σ_T свариваемого металла, в результате чего в объеме $V_{\text{д}}$ (рис. 9.21б) металл размягчается и переходит в пластическое состояние, а в объеме ядра $V_{\text{я}}$, нагретом выше температуры плавления, он расплавляется. Объем металла $V_{\text{д1}}$ (заштрихован косой линией) продолжает увеличиваться за счет температурного расширения, а объем металла $V_{\text{я}}$ ядра — дополнительно на 3,5...6,5% за счет изменения фазового состояния. Интенсивное расширение жидкого металла происходит в замкнутом объеме. Это приводит к возникновению гидростатического давления внутри ядра $p_{\text{я}}$ и росту интенсивности внутренних напряжений σ_i в объеме металла $V_{\text{д1}}$, диаметр которого $d_{\text{д}}$ на 5...15% превышает диаметр $d_{\text{п}}$ уплотняющего пояска. Одновременно значительная часть металла в объеме $V_{\text{д1}}$ нагревается до температуры рекристаллизации и σ_T становится меньше величины интенсивности напряжений σ_i ($\sigma_T < \sigma_i$). В результате силового

воздействия со стороны электродов происходит направленное пластическое течение металла (светлые стрелки на рисунке 9.21а), в основном в зазор между деталями, что способствует дальнейшему формированию и росту диаметра уплотняющего пояска вокруг литого ядра. При этом объем металла $V_{д2}$, расположенный над ядром, оседает в объем ядра, практически не деформируясь. Это приводит к интенсивному росту глубины вмятины $g_{вм}$ от электродов на внешней поверхности деталей. В момент выключения тока она может достигать 5–10% от толщины детали.

При сварке по циклограмме с постоянной силой сжатия $F_{св}$ можно предположить наличие равновесия сил между $F_{св}$ и силами $F_{я}$, обусловленными давлением жидкого металла ядра, и $F_{п}$ со стороны уплотняющего пояска, которые стремятся увеличить зазор между деталями. Условие равновесия сил имеет вид: $F_{св} = F_{я} + F_{п}$. Если сила $F_{св}$ недостаточна, а сила $F_{я}$ велика при малой силе $F_{п}$, то нарушается устойчивость процесса сварки, так как растет вероятность раскрытия зазора между деталями, прорыва уплотняющего пояска и выброса в зазор части жидкого металла ядра. Таким образом, конечный внутренний выплеск образуется при условии: $F_{св} \leq F_{я}$, $d_{п} \rightarrow d$. При соблюдении неравенства $F_{св} > F_{я}$ и $d_{п} > d$ выплески маловероятны, т. е. процесс сварки устойчив против образования выплеска.

Рассмотрение процесса контактной сварки с позиции динамики развития температурных и деформационных полей показывает, что общая причина появления выплесков заключается в отставании скорости деформации от скорости нагрева металла межэлектродной области. Поэтому бороться с выплесками целесообразно за счет снижения сопротивления металла пластическому деформированию, для чего следует использовать мягкие режимы, предварительный подогрев отдельным или модулированным импульсом тока, униполярные импульсы низкочастотных машин и машин постоянного тока. Помимо этого, предупредить конечный выплеск удастся при использовании машин с высокими динамическими свойствами механизма сжатия, в том числе — снабженных сервоприводами, позволяющими программировать (увеличивать) силу сжатия на стадии нагрева.

На третьем этапе после выключения тока происходит охлаждение неравномерно нагретого металла в межэлектродной области, его кристаллизация в ядре и уменьшение объема (усадка). Под действием силы $F_{св}$ продолжается пластическая деформация металла и внедрение электродов в детали до момента превышения пределом текучести величины интенсивности напряжений σ_i ($\sigma_T > \sigma_i$). В конце этапа глубина вмятины может превысить 15% толщины детали. В результате охлаждения восстанавливается исходный уровень предела текучести материала в объеме $V_{д}$. Из-за несвободной усадки и действия силы сжатия в межэлектродной области возникает трехосное напряженное состояние металла и формируется неравномерное поле внутренних остаточных напряжений и деформаций. Механизм образования этих напряжений можно пояснить следующим образом.

При остывании металл межэлектродной области сокращается в осевом (вдоль оси z) и радиальном (вдоль оси r) направлении. Уменьшение объема $V_{д}$ металла в этих направлениях происходит неравномерно. В начале охлаждения

усадка вдоль оси z в значительной степени компенсируется деформацией металла от $F_{св}$, поэтому в этом направлении растягивающие напряжения невелики.

В радиальном направлении вдоль оси r свободному укорочению остывающих внутренних слоев металла, например в виде кольца, препятствуют соседние наружные более холодные слои. Не имея возможности сократиться в полной мере, металл данных слоев оказывается в растянутом состоянии. В результате в объеме $V_{я}$ образуются остаточные растягивающие радиальные σ_r и окружные σ_θ напряжения. По мере удаления от ядра температура и величина усадки снижаются, поэтому растягивающие напряжения уменьшаются до нуля. На значительном расстоянии (в зоне термического воздействия) окружные σ_θ напряжения меняют свой знак и превращаются в сжимающие. Следовательно, поля остаточных сварочных напряжений уравниваются.

Следует иметь в виду, что в процессе охлаждения и несвободной усадки, растягивающие напряжения в зоне ядра могут превышать не только значение σ_T , но и временное сопротивление металла σ_B при растяжении. Следовательно, при кристаллизации, когда металл ядра находится в твердожидком состоянии и имеет малую пластичность и прочность, велика вероятность разрушения металла. Поэтому при значительном уровне растягивающих напряжений возможно появление горячих трещин в ядре точки и в ЗТВ, которые образуются преимущественно в сплавах с широким интервалом кристаллизации в температурном интервале хрупкости.

При кристаллизации и охлаждении металла происходит уменьшение его объема (усадка), поэтому при недостаточной силе сжатия, из-за нехватки металла в замкнутом объеме ядра, возможно образование дефектов — усадочных раковин и рыхлот, локализующихся в центре ядра.

Таким образом, несвободная усадка при точечной сварке сопровождается формированием поля остаточных растягивающих напряжений и дефектов металла ядра. Оба эти явления нежелательны, так как могут вызвать разрушение сварного соединения в процессе сварки или при эксплуатации.

Компенсировать усадку металла и предотвратить тем самым образование дефектов возможно, если обеспечить пластическое течение металла в этот период сварки путем соответствующего программного увеличения силы сжатия и замедления охлаждения металла. Эти приемы позволяют не только уменьшить растягивающие напряжения σ_r и σ_θ в ядре, но даже сделать их сжимающими.

Основным способом снижения растягивающих напряжений является применение повышенной ковочной силы $F_{ков}$ (рис. 11.4) или плавного ее увеличения, при котором можно получить постоянное давление на охлаждающийся металл и сжимающие остаточные напряжения.

Приложение $F_{ков}$ должно совпадать с началом кристаллизации металла. Ковочная сила должна сохраняться до полного охлаждения зоны сварки. При более раннем приложении $F_{ков}$ возможно выдавливание металла ядра в зазор между деталями и увеличение глубины вмятин под электродами. Если $F_{ков}$ будет приложено в конце кристаллизации, то сопротивление деформации металла будет велико и образуются несплошности в литом металле ядра.

Степень снижения растягивающих напряжений в ядре зависит также от сопротивления пластической деформации металла и времени проковки. Уменьшение сопротивления металла деформированию можно достичь путем замедленного охлаждения при использовании подогрева дополнительным послесварочным импульсом тока или путем замедленного спада заднего фронта импульса сварочного тока. При этом возможно снизить величину $F_{\text{ков}}$ и увеличить время проковки. Эти приемы особенно эффективны при сварке высокопрочных материалов большой толщины. При сварке малых толщин (до 1 мм) обеспечить необходимую для снижения остаточных растягивающих напряжений деформацию можно без приложения повышенной $F_{\text{ков}}$.

При шовной сварке деталей толщиной 2–3 мм кристаллизация металла может частично или полностью происходить без внешнего давления, из-за непрерывного перемещения деталей между вращающимися роликами. При этом велика вероятность образования усадочных раковин, рыхлот и трещин, последние располагаются перпендикулярно к оси шва. Для борьбы с дефектами рекомендуется применять шаговую сварку, при которой ролики и детали остаются неподвижными во время нагрева, расплавления и кристаллизации металла. В этом случае возможно применение повышенной $F_{\text{ков}}$. Шаговое вращение роликов применяется обычно при сварке алюминиевых, магниевых и медных сплавов.

При рельефной многоточечной сварке листовых сталей со штампованными рельефами круглой формы сдвиговая пластическая деформация металла в контакте между рельефом и листом начинается уже на этапе приложения силы сжатия. После включения сварочного тока в результате нагрева начинается интенсивное смятие рельефов, развиваются процессы заполнения металлом полости лунки, зазор между деталями захлопывается. При смятии рельефа развивается интенсивная радиально направленная пластическая деформация металла в месте сварки, что способствует формированию соединения в твердой фазе. Затем по мере зарождения и роста литого ядра, как и при точечной сварке, формируется поле временных напряжений. После выключения сварочного тока происходит охлаждение и кристаллизация расплавленного металла, и его несвободная усадка, сопровождающиеся образованием остаточных растягивающих напряжений и усадочных дефектов. Компенсировать усадку металла и тем самым уменьшить количество дефектов типа раковин и рыхлот путем применения повышенной силы $F_{\text{ков}}$ практически не возможно. Это обусловлено тем, что развитые плоские рабочие поверхности электродов не могут сблизиться под действием $F_{\text{ков}}$ и осадить кристаллизующийся металл ядра в нескольких локально расположенных рельефах. Такому сближению мешают холодные участки металла вокруг рельефов, на которые опираются электроды. Снизить уровень остаточных напряжений и бороться с дефектами при рельефной сварке наиболее целесообразно, используя повышенную силу сжатия (циклограмма *a*, рис. 11.4) и двухимпульсный режим нагрева (циклограмма *б*, рис. 11.4). Первый (подогревный) импульс тока — для выравнивания высоты рельефов; второй (сварочный), желательно с плавным нарастанием, — для предупреждения выплесков. Режим сварки должен быть при этом средней жесткости.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается смысл понятия «активное электрическое сопротивление контакта»?
2. Какие составляющие электрических сопротивлений определяют общее сопротивление межэлектродной области?
3. Каково строение (структура) фактической поверхности реальных деталей, подлежащих сварке?
4. От каких факторов зависит электрическое сопротивление контактов?
5. Какова роль контактных сопротивлений и собственного сопротивления деталей в качестве источников теплоты при сварке?
6. В чем заключается смысл понятия «термическое сопротивление контакта»?
7. Какие существуют методы стабилизации электрических и термических сопротивлений?
8. Как в процессе точечной сварки изменяются общее сопротивление и его составляющие?
9. Как распределяется плотность тока в контактах и деталях при точечной, шовной и рельефной сварке?
10. Какие источники теплоты определяют нагрев металла межэлектродной области?
11. Какой характер температурного поля формируется при точечной сварке деталей равной толщины и как оно зависит от теплофизических свойств металла?
12. Что такое «уравнение теплового баланса» и какие составляющие входят в него?
13. Как рассчитать силу сварочного тока при точечной сварке, используя уравнение теплового баланса?
14. Что такое: «жесткий» и «мягкий» режимы сварки и как они влияют на характер температурного поля?
15. В чем состоит шунтирование сварочного тока и какие факторы его определяют?
16. Как протекает пластическая деформация металла при нагреве и охлаждении при точечной сварке?
17. Чем вызывается объемная усадка металла в межэлектродной области при охлаждении и кристаллизации и каково ее влияние на образование дефектов?
18. Как образуются остаточные сварочные напряжения при точечной сварке и какие применяют методы их снижения?

ГЛАВА 10 ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СТЫКОВЫХ СПОСОБАХ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

10.1. ФОРМИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЗОНЫ СВАРКИ ПЕРЕД ПРОТЕКАНИЕМ СВАРОЧНОГО ТОКА

Установка деталей в электродах стыковой машины является подготовительной операцией перед процессом сварки. Каждый электрод состоит из двух разъемных частей. Разъемные части электродов имеют вырезы для точной установки деталей (рис. 10.1).

Главным требованием при установке является обеспечение соосности деталей. Установка деталей сопровождается их зажатием в электродах силами $F_{\text{зак}}$. В процессе сварки детали сжимаются осевыми силами F_n , $F_{\text{опл}}$, $F_{\text{ос}}$ (рис. 10.1). Индексы в обозначении сил означают: нагрев (н), оплавление (опл), осадка (ос). Детали при осевом сжатии не должны смещаться в электродах. Их удерживание в электродах от проскальзывания осуществляется силами трения в контактах электрод — деталь. Величина силы трения определяется выражением

$$F_{\text{тр}} = 2f \cdot F_{\text{зак}}, \quad (10.1)$$

где f — коэффициент трения.

Отсутствие проскальзывания определяется условием

$$F_{\text{тр}} > F_{\text{ос}}, \quad (10.2)$$

где $F_{\text{ос}}$ — осевая сила сжатия деталей.

Формулы 10.1 и 10.2 дают соотношение

$$F_{\text{зак}} > F_{\text{ос}} / 2f.$$

Электроды стыковых машин изготавливают из специальных бронз, которые являются низколегированными медными сплавами. Коэффициент трения в контакте бронзового электрода с деталью существенно меньше единицы. Из-за низкого коэффициента трения силы зажатия деталей в электродах в 2...4 раза больше осевой силы.

Электроды стыковых машин, называемые также электродными губками, в процессе работы изнашиваются. Износ губок в контакте с деталями происходит в виде смятия при больших силах зажатия и истирания при проскальзывании детали, если силы трения в контакте малы из-за малых сил зажатия. Для уменьшения сил зажатия используют специальные упоры, которые воспринимают осевые силы, действующие на детали, если это возможно по условиям

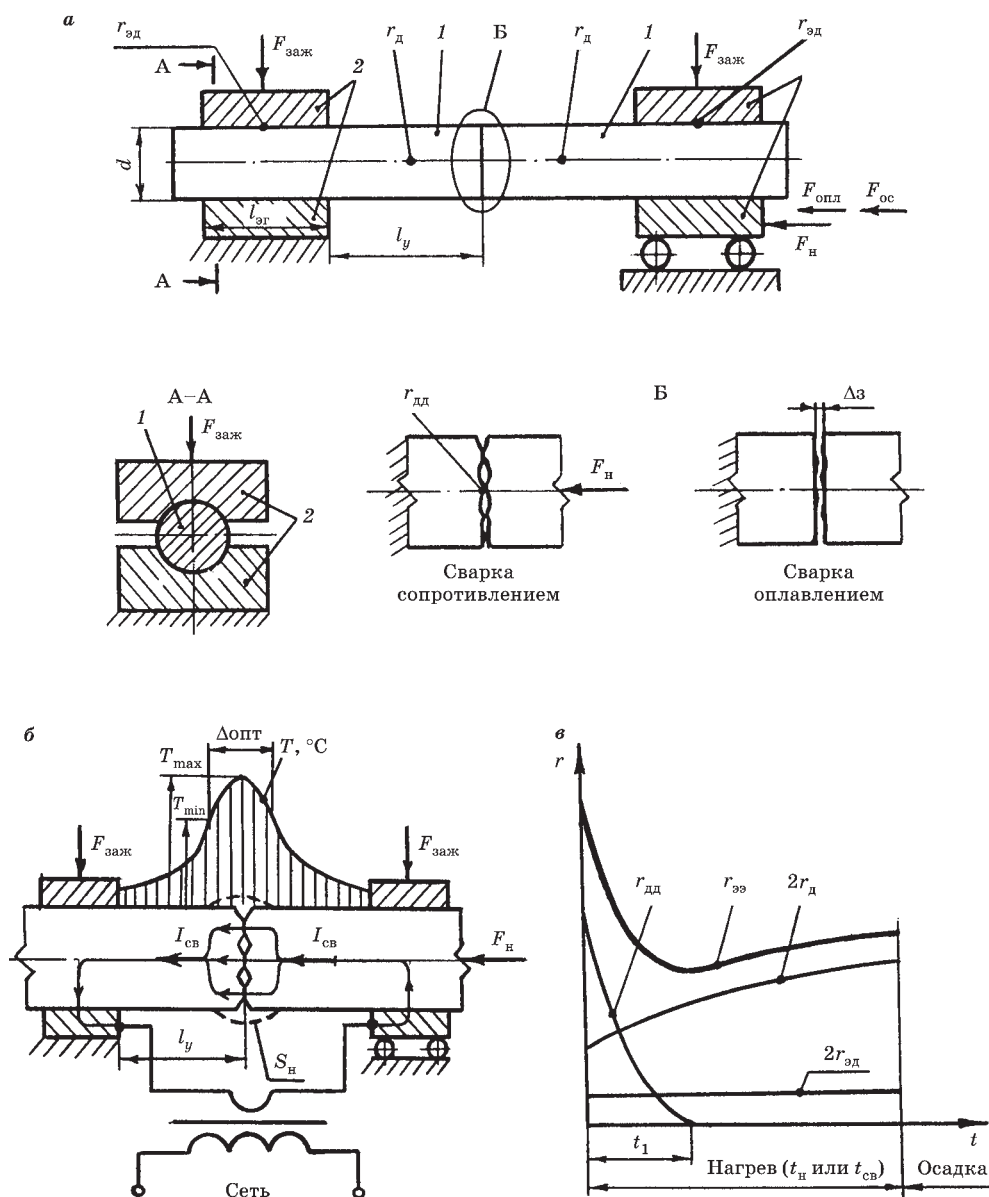


Рис. 10.1

Схема сопротивлений при стыковой сварке перед протеканием сварочного тока (а) и нагрев деталей при сварке сопротивлением (б, в):

1 — детали; 2 — электроды; $r_{д}$ — сопротивление детали; $r_{эд}$ и $r_{дд}$ — контактные сопротивления электрод — деталь и деталь — деталь; $F_{зж}$ — сила зажатия детали в электродах; l_y — установочная длина; $l_{эг}$ — длина электродной губки; $F_{н}$, $F_{опл}$, $F_{ос}$ — силы при нагреве, оплавлении и осадке; Δ_3 — минимальный зазор между деталями перед протеканием тока при сварке оплавлением; $I_{св}$ — сварочный ток; $S_{н}$ — деформация деталей при нагреве; T — температура нагрева деталей; $T_{мин}...T_{макс}$ — диапазон оптимальных температур; $\Delta_{опт}$ — зона оптимального нагрева; $r_{ээ}$ — сопротивление электрод — электрод; $t_{н}$ или $t_{св}$ — время нагрева или сварки; t_1 — время существования сопротивления $r_{дд}$.

конструкции последних. При этом сила зажатия должна обеспечить только надлежащий электрический контакт электрод — деталь.

Контактное сопротивление электрод — деталь $r_{эд}$ определяется силой зажатия деталей в электродах и состоянием контактирующих поверхностей (микрошероховатостью и окисленностью) электрода и детали.

Величину контактного сопротивления $r_{эд}$ можно оценить по эмпирической формуле:

$$r_{эд} = r_0 / F^\alpha, \quad (10.3)$$

где r_0 — сопротивление контакта при силе сжатия поверхностей в 1 даН (1 кгс) с учетом их состояния; F — сила сжатия поверхностей, даН (кгс); α — коэффициент, зависящий от типа металла контактирующих деталей.

Из формулы (10.3) вытекает важное следствие: с ростом силы сжатия контактное сопротивление резко падает.

При отсутствии на зажимаемых поверхностях деталей загрязнений, например ржавчины или окалины, номинальная сила зажатия обуславливает пониженное значение сопротивления электрод — деталь. В противном случае даже чрезмерно увеличенная сила зажатия не в состоянии механически разрушить выше перечисленные оксиды и создать требуемую электрическую проводимость контакта. Поэтому боковые поверхности деталей в местах их зажима в электродных губках необходимо очищать от ржавчины, окалины, краски и прочих загрязнений. Большое сопротивление $r_{эд}$ вызывает перегрев контакта, что приводит к износу губок в виде окисления их поверхностей.

Сопротивления деталей $2r_d$ при стыковых способах сварки определяется выражением

$$2r_d = K_n \cdot \rho_\tau \cdot 2 \cdot l_y / S, \quad (10.4)$$

где K_n — коэффициент поверхностного эффекта; ρ_τ — удельное сопротивление металла детали, зависящее от температуры нагрева под сварку; l_y — установочная длина детали (рис. 10.1); S — поперечное сечение детали.

При прочих равных условиях сопротивление отдельной детали зависит от ее установочной длины. Установочная длина определяется технологическими рекомендациями в зависимости от разновидности стыковой сварки (сопротивлением или оплавлением), типа материала деталей и ее поперечного сечения (круглый прут, труба, лист и т. д.). Для металлов с высокой теплопроводностью (алюминий, медь и их сплавы) установочную длину необходимо увеличивать для снижения отвода тепла от зоны стыка в электроды. Например, при сварке сопротивлением круглых прутков диаметром d из стали $l_y = (0,7 \dots 1,0) \cdot d$, а из меди — $l_y = (2,5 \dots 4,0) \cdot d$.

Коэффициент поверхностного эффекта учитывается только при сварке на переменном токе. Поверхностный эффект характеризуется вытеснением тока из центральной зоны поперечного сечения детали в ее поверхностные слои, что равносильно уменьшению токопроводящей площади детали и увеличению ее сопротивления.

Увеличение сопротивления детали учитывается коэффициентом $K_n \geq 1$, который возрастает с ростом площади сечения детали и частоты тока. При

сварке круглых прутков из углеродистой стали диаметром 30 мм величина $K_{\pi} = 1,25 \dots 1,5$, что является уже ощутимым проявлением поверхностного эффекта. Величину K_{π} определяют расчетным путем.

При *стыковой сварке* сопротивлением контактное сопротивление деталь — деталь $r_{\text{дд}}$ формируется до протекания сварочного тока за счет сжатия торцовых поверхностей деталей силой F_{π} . Факторами, влияющими на сопротивление $r_{\text{дд}}$, являются величина силы сжатия F_{π} , состояние поверхности торцов и вид металла.

При сварке углеродистых и низколегированных сталей на поверхностях торцов не допускаются оксиды в виде ржавчины и окалина. Из-за повышенной толщины они могут незначительно разрушиться под действием силы сжатия F_{π} , создав зону проводимости с весьма большим сопротивлением $r_{\text{дд}}$, либо остаться в виде сплошного слоя, что исключит электрический контакт между деталями и протекание сварочного тока. Торцы деталей из других металлов и сплавов также необходимо перед сваркой очищать от оксидных пленок.

При *стыковой сварке оплавлением* электрический контакт между деталями до протекания сварочного тока отсутствует из-за преднамеренно созданного воздушного зазора между торцами деталей (рис. 10.1), который необходим по условиям техники выполнения процесса сварки.

Перед началом сварки на детали, установленные с зазором, величиной не более 15% от припуска на оплавление (см. п. 12.4) подается напряжение от источника сварочного тока. После этого подвижная деталь начинает перемещаться с определенной скоростью к неподвижной. При этом зазор закрывается, между торцами деталей под малым давлением ($\approx 0,01 \text{ МПа}$) образуется электрический контакт и начинается протекание тока, называемого током оплавления. Контактное сопротивление деталь — деталь $r_{\text{дд}}$ образуется в процессе оплавления торцов деталей.

10.2. ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Нагрев зоны сварки. Для упрощения понимания теплофизических и деформационных процессов в свариваемых деталях рассмотрим формирование сварного соединения на более простом примере сварки стержней с одинаковой формой и размерами поперечного сечения из одноименного металла (рис. 10.1б).

Нагрев деталей начинается с момента включения сварочного тока, при протекании которого на каждом сопротивлении зоны сварки выделяется тепло в соответствии с законом Джоуля — Ленца. Доля тепла, выделяющегося на каждом сопротивлении, пропорциональна данному сопротивлению и меняется на протяжении времени нагрева (времени сварки) из-за изменения последних.

Контактное сопротивление деталь — деталь $r_{\text{дд}}$ в начальные моменты протекания сварочного тока имеет наибольшее значение, как это видно из рисунка 10.1в. Ток в контакте протекает через отдельные зоны проводимости (микроконтакты), которые интенсивно нагреваются и пластически деформируются

силой F_n . При пластической деформации дробятся пленки оксидов металла, увеличивается суммарная площадь токопроводящего контакта, что приводит к снижению контактного сопротивления, которое через некоторое время t_1 практически исчезает полностью. Время t_1 составляет примерно 10% от времени протекания сварочного тока. С другой стороны, за небольшое время t_1 , пока существует сопротивление $r_{\text{дд}}$, на нем выделяется повышенное количество тепла по сравнению с тем, что выделяется на других сопротивлениях за это же время.

Выделенное тепло приводит к интенсивному нагреву приконтактных слоев металла и возрастанию его удельного электрического сопротивления, что увеличивает сопротивление данных слоев.

Сопротивления деталей $2r_{\text{д}}$ после исчезновения контактного сопротивления $r_{\text{дд}}$ являются практически единственными факторами выделения тепла в зоне сварки. Наибольшее количество тепла выделяется в области стыка в приконтактных слоях металла деталей из-за их повышенного сопротивления. По мере нагрева деталей по всей установочной длине повышаются удельное сопротивление металла и сопротивления деталей в целом (рис. 10.1а), что сопровождается дальнейшим ростом выделения тепла.

Контактные сопротивления электрод — деталь $2r_{\text{эд}}$ практически мало или вообще не влияют на нагрев металла в зоне стыка из-за их незначительной величины и большой удаленности от него.

Отвод тепла от зоны сварки вглубь деталей и далее в электроды сопутствует всему процессу нагрева. В соответствии с законом Фурье, количество отводимого от зоны нагрева тепла пропорционально коэффициенту теплопроводности металла, поверхности, через которую отводится тепло, градиенту температуры на данной поверхности и времени.

При равенстве поперечных сечений деталей и их коэффициентов теплопроводности, теплоотвод от зоны сварки в обе детали одинаков и не нарушает симметрии температурного поля (рис. 10.1б). Максимальное выделение тепла в контакте и симметричный теплоотвод создают условие для формирования в области стыка зоны максимальных температур с ее симметричным распределением в обе детали. Однако реальное распределение температуры нагрева в деталях будет зависеть от потерь тепла от зоны стыка за счет теплопроводности. Конечной целью нагрева является оптимизация по ряду параметров температурного поля в области стыка.

Оптимизация температурного поля в зоне стыка включает в себя нагрев металла до оптимального диапазона температур в пределах оптимальной ширины (рис. 10.1б). Под оптимальным диапазоном температур понимаются такие температуры, при которых металл приобретает высокую пластичность без заметного ухудшения структуры. Высокая пластичность металла необходима для его пластической деформации при осадке после нагрева.

Практически для всех деформируемых металлов и сплавов определены температурные интервалы деформации $T_{\text{min}}...T_{\text{max}}$, в пределах которых материалы имеют максимальную пластичность. Для основных металлов и сплавов данные интервалы имеют следующие значения: для углеродистых сталей — 750...1280°C, для высоколегированных сталей — 820...1150°C, для алюминия и его сплавов — 350...500°C, для титана и его сплавов — 700...1200°C.

Нагрев вызывает изменения в структуре металла. Высокие температуры нагрева вызывают вначале рост зерна металла, а в дальнейшем приводят к его пережогу. Пережог металла заключается в окислении или оплавлении границ его зерен и является неустранимым дефектом.

При сварке сопротивлением максимальная температура нагрева металла T_{\max} определяется величиной $(0,8 \dots 0,9) T_{\text{пл}}$, где $T_{\text{пл}}$ — температура его плавления. Например, при сварке низкоуглеродистой стали максимальные температуры нагрева составляют $1200 \dots 1300^\circ\text{C}$, выше которых наступает пережог.

Оптимальная ширина зоны нагрева $\Delta_{\text{опт}}$ (рис. 10.1б) необходима для получения в области стыка пластической деформации требуемой величины, при которой из стыка выдавливаются оксиды, перегретый и пережженный металл. Ширина нагретого участка в интервале оптимальных температур зависит от градиента температуры в области стыка. Большой градиент температуры, обусловленный крутым фронтом ее нарастания к плоскости стыка, сужает зону оптимального нагрева и этим затрудняет пластическую деформацию металла в области стыка при осадке, хотя и сохраняя при этом высокую степень ее локальности. Поэтому при нагреве, помимо температуры, необходимо оптимизировать и температурный градиент в околостыковой области.

Окисление поверхностей деталей является сопутствующим фактором всего процесса нагрева. Наиболее вредным является окисление торцовых поверхностей деталей. Поверхностные оксиды затрудняют и могут вообще воспрепятствовать формированию сварного соединения при стыковой сварке сопротивлением. Интенсивное окисление металла на торцах деталей с ростом температуры усугубляется свободным доступом к ним кислорода воздуха из-за начального неплотного контакта деталь — деталь (рис. 10.1б).

Ограничение окисления металла можно получить за счет сокращения времени нагрева. Минимизацию времени нагрева используют при сварке сопротивлением. Для более полного подавления окисления применяют внешнюю защиту зоны сварки газами, которые по отношению к данному металлу являются инертными или восстановительными в области оптимальных температур нагрева.

Контроль нагрева металла в области стыка до оптимального состояния при сварке сопротивлением выполняется либо по заданной величине осадки под током, либо по заданному времени протекания сварочного тока, т. е. времени нагрева (сварки).

С началом нагрева металл пластически деформируется под действием осевой силы F_n . Данная пластическая деформация называется осадкой под током. При достижении заданной величины осадки под током сварочный ток выключается путевым выключателем, связанным с подвижным электродом (губкой) контактной машины. Во втором случае сварочный ток выключается после истечения установленного времени нагрева. Для более точного контроля нагрева следует использовать приборы для измерения температуры, например, пирометры.

Оптимальные величины осадки под током и времени нагрева определяются экспериментальным методом или ориентировочно по справочным материалам с последующей экспериментальной проверкой. После нагрева выполняется заключительная операция сварки сопротивлением — осадка.

Осадка при стыковой сварке сопротивлением. Осадка как отдельная временная фаза процесса сварки начинается после выключения сварочного тока. При сварке деталей с малым поперечным сечением (до 100 мм^2) сила осадки $F_{\text{ос}}$, как правило, остается равной силе сжатия при нагреве $F_{\text{н}}$.

Детали повышенного поперечного сечения и из металла с высоким сопротивлением пластической деформации (например, из высоколегированных сталей) осаживают большей силой, чем сила сжатия при нагреве.

При осадке в процессе сварки, как это видно из рисунка 10.2, происходит некоторое укорочение деталей в зоне стыка при одновременном увеличении площади сечения.

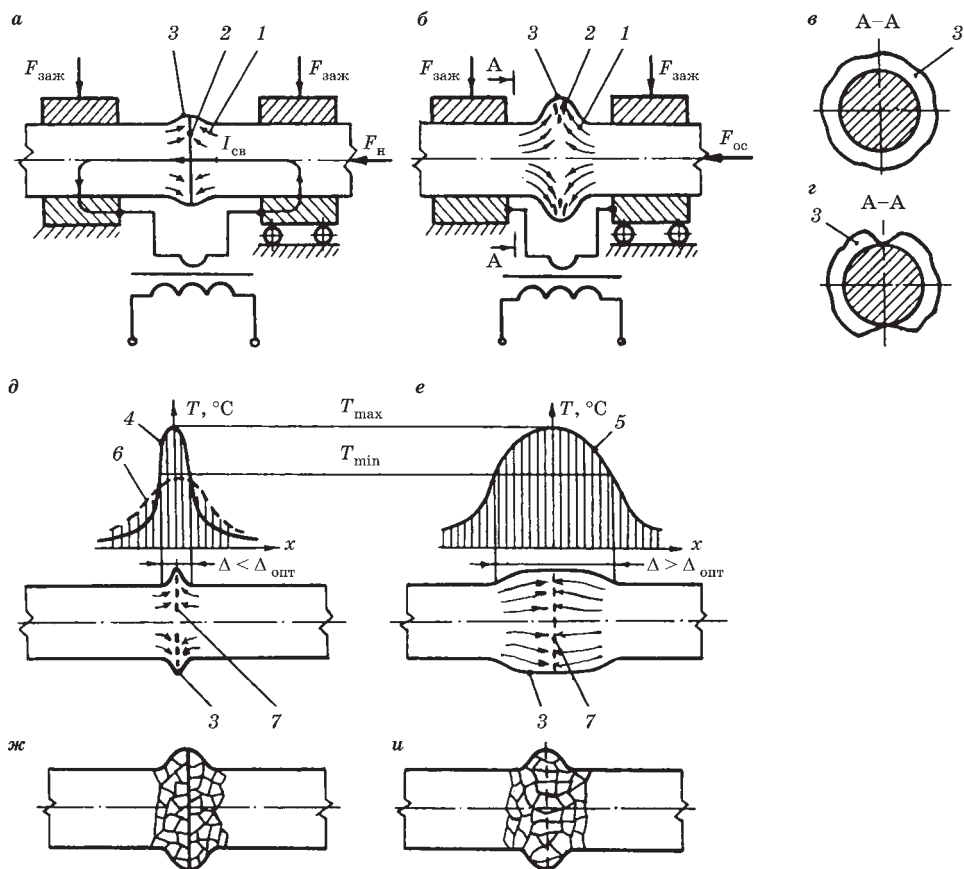


Рис. 10.2

Осадка и рекристаллизация металла при стыковой сварке сопротивлением:

a — осадка под током; *б* — общая осадка; *в* — равномерный грат по периметру стыка; *г* — неравномерный грат по периметру стыка; *д* — локальная деформация недостаточной величины; *е* — нелокальная деформация; *ж* — примыкание зерен своими границами друг к другу после осадки; *и* — образование новых зерен в плоскости стыка после рекристаллизации; *1* — направления течения металла при деформации; *2* — оксиды; *3* — грат; *4* — нагрев с высоким градиентом температуры (dT/dx); *5* — нагрев с низким градиентом температуры; *6* — недогрев; *7* — оксиды в стыке; $I_{\text{св}}$ — сварочный ток; $F_{\text{н}}$, $F_{\text{ос}}$ — силы при нагреве и осадке; $F_{\text{зак}}$ — сила зажатия детали в электродах; T , x — температура нагрева металла и расстояние от стыка; $T_{\text{min}} \dots T_{\text{max}}$ — интервал оптимальных температур нагрева; Δ , $\Delta_{\text{опт}}$ — текущая и оптимальная ширина зоны нагрева.

Целью осадки при стыковой сварке является формирование сварного соединения. Для достижения данной цели необходимо решить главную задачу — выдавливание оксидов и прочих загрязнений из зоны стыка деталей.

Оксиды являются главным препятствием в образовании сварного соединения. Находясь на торцовых поверхностях деталей, они не позволяют сблизить поверхностные атомы до периода кристаллической решетки свариваемого металла, что необходимо для образования межатомных связей металлического типа. Так, например, на железе в сухом воздухе после предварительной очистки поверхности от оксидов толщина новой оксидной пленки за 5...6 мин достигает величины 10...20 Å (1 Å ангстрем составляет 10^{-10} м), что в 3,5...7 раз больше периода кристаллической решетки железа (2,806 Å).

В условиях высокотемпературного нагрева металла на воздухе, как это имеет место при стыковой сварке сопротивлением, толщина образующихся оксидных пленок составляет десятки микрометров или сотни тысяч ангстрем.

Принципиально можно получить сварное соединение через оксиды железа FeO и марганца MnO, так как они имеют одинаковую по строению и близкую по размерам кристаллические решетки с α -железом, имеющим объемно-центрированную кубическую решетку (ОЦК). Это обуславливает прочную связь окалины с поверхностью углеродистых и низколегированных сталей. Сварные соединения из углеродистых сталей через тонкую оксидную пленку FeO (менее 50 мкм) имеют высокую статическую прочность до 80...90% от прочности основного металла. Однако такие соединения имеют крайне низкие пластичность и ударную вязкость из-за высокой твердости и хрупкости оксидов по отношению к основному металлу и являются недопустимыми. Поэтому для формирования качественного сварного соединения необходимо удаление оксидов из зоны стыка.

Пластическая деформация металла, протекающая при осадке, позволяет выдавить оксиды из стыка на периферию. Трудность выдавливания оксидов из стыка при сварке сопротивлением обусловлена тем, что они, являясь сами твердыми при температурах оптимального нагрева под сварку $T_{\min}...T_{\max}$, расположены на твердом металле и имеют с ним прочную связь. Выдавить оксиды можно только вместе с твердым металлом при его пластической деформации в области стыка.

Как видно из рисунка 10.2б, пластическая деформация должна сопровождаться интенсивным радиальным перемещением металла в области стыка из центральных зон на периферию, что обеспечивает выдавливание оксидов, пережженного и перегретого крупнозернистого металла и прочих загрязнений. Выдавленный из стыка металл называется гратом (рис. 10.2б). Для выполнения данного требования деформация металла в области стыка должна быть локальной (местной) и оптимальной по объему выдавленного металла.

Оптимальность выдавленного объема металла при условии его локальной пластической деформации в области стыка оценивается коэффициентом деформации D , равным отношению

$$D = S_c / S_d, \quad (10.5)$$

где S_c и S_d — площади сечений стыка с учетом грата и детали соответственно.

Значения коэффициента D зависят от типа металла: для стали он составляет 2,0...2,5, для алюминия — 2...4.

Выполнение условий протекания пластической деформации при осадке определяется характером нагрева металла в области стыка, при котором, как было указано ранее, интервал оптимальных температур нагрева $T_{\min}...T_{\max}$ должен находиться в пределах оптимальной ширины $\Delta_{\text{опт}}$ относительно плоскости стыка (рис. 10.1б). Отклонения в характере нагрева металла зоны стыка сопровождаются отклонениями и в характере его пластической деформации при осадке и снижением качества сварного соединения.

На рисунке 10.2д деформация после осадки имеет локальный характер, но является недостаточной по объему выдавленного металла. Оксиды при этом выдавливаются не полностью, что обуславливает низкое качество сварного соединения. Причинами этого являются либо нагрев металла ниже оптимальных температур, либо недостаточная ширина зоны нагрева в пределах оптимального интервала температур.

При широкой зоне нагрева (рис. 10.2е) деформация престаёт быть локальной. Оксиды при этом полностью остаются в стыке из-за отсутствия в нем радиального течения металла, определяя этим плохое качество сварного соединения.

Форма полученного грата позволяет судить о качестве соединения. Равномерное распределение грата по периметру стыка, при условии полученного в заданных пределах коэффициента D , говорит о выдавливании оксидов по всему сечению и служит признаком хорошего качества (рис. 10.2в). В местах отсутствия грата (рис. 10.2г) образуются непровары из-за оставшихся в стыке оксидов.

Формирование *металлических связей* между атомами в зоне стыка протекает в ходе пластической деформации после выдавливания оксидов и сближения атомов до периода кристаллической решетки. При этом активированные теплом атомы вступают в химическое взаимодействие, в ходе которого происходит коллективизация валентных электронов, а между атомами, т. е. теперь уже положительными ионами, при участии коллективизированных электронов образуется металлическая связь.

Таким образом, пластическая деформация металла во время осадки является важнейшим процессом при стыковой сварке, который обеспечивает все условия для формирования качественного сварного соединения

Рекристаллизация металла в зоне стыка после осадки обуславливает дополнительное упрочнение сварного соединения после образования металлических связей. Начинается процесс рекристаллизации при температурах нагрева $0,4 T_{\text{пл}}$ для чистых металлов и $(0,5...0,6) T_{\text{пл}}$ для сплавов, где $T_{\text{пл}}$ — температура плавления металла или сплава, выраженная в абсолютной шкале температур.

При стыковой сварке рекристаллизация металла приводит к образованию общих зерен в плоскости стыка (рис. 10.2и). Прочность соединения при этом возрастает по сравнению с тем, когда зерна металла только примыкают своими границами друг к другу по всей площади стыка (рис. 10.2ж). Для протекания рекристаллизации необходимо сохранить в области стыка после осадки достаточно нагретый, но не перегретый металл, чтобы не вызвать этим чрезмерного

укрупнения зерна и падения пластичности сварного соединения. При выдавливании всего нагретого металла получается ослабленное сварное соединение из-за отсутствия в нем общих зерен в плоскости стыка.

Искривление волокнистой текстуры металла в зоне стыка после осадки является следствием локальной радиальной пластической деформации. Оно усиливается с ростом величины осадки деталей и может привести к расслоению металла по волокнам, что является опасным дефектом (рис. 10.3в).

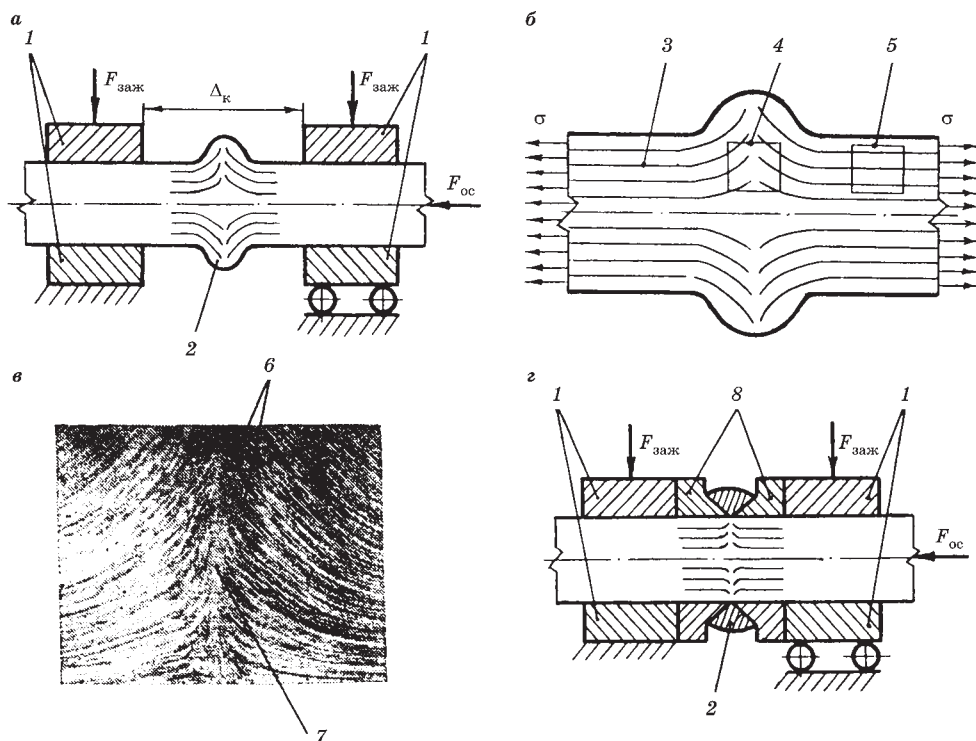


Рис. 10.3

Виды осадки и искривление волокон в сварном соединении при стыковой сварке:

а — осадка со свободной деформацией; *б* — схема напряженного состояния от действия внешних сил; *в* — макроструктура сварного соединения из алюминиевого сплава АМг6; *г* — осадка с принудительным формированием и срезанием грата; 1 — электроды; 2 — грат; 3 — волокна из неметаллических включений; 4, 5 — области действия напряжений поперек и вдоль волокон; 6 — расслоение между волокнами; 7 — стык; 8 — ножи для срезания грата; $F_{зак}$ и $F_{ос}$ — силы зажатия деталей в электродах и осадки; Δ_k — расстояние между электродами после осадки, σ — напряжение от внешней силы.

Кроме того, искривление волокон вызывает снижение механической прочности соединения, так как в стыке напряжения направлены поперек волокон, а не вдоль, как в основном металле (рис. 10.3б). Уменьшить искривление волокон можно переходом от осадки со свободной деформацией (рис. 10.3а) к осадке со срезанием грата (рис. 10.3г).

Напряженное состояние металла в зоне стыка, вызванное действием осевой силы, сопутствует всему процессу стыковой сварки сопротивлением и имеет сложный характер (рис. 10.4а). Продольные σ_x и радиальные σ_r напряжения

во всех зонах стыка являются сжимающими. Тангенциальные напряжения σ_τ на периферии стыка и в области грата меняются с сжимающих на растягивающие. Растягивающие напряжения σ_τ в зависимости от своей величины могут вызвать образование трещин по периметру последнего (рис. 10.4е).

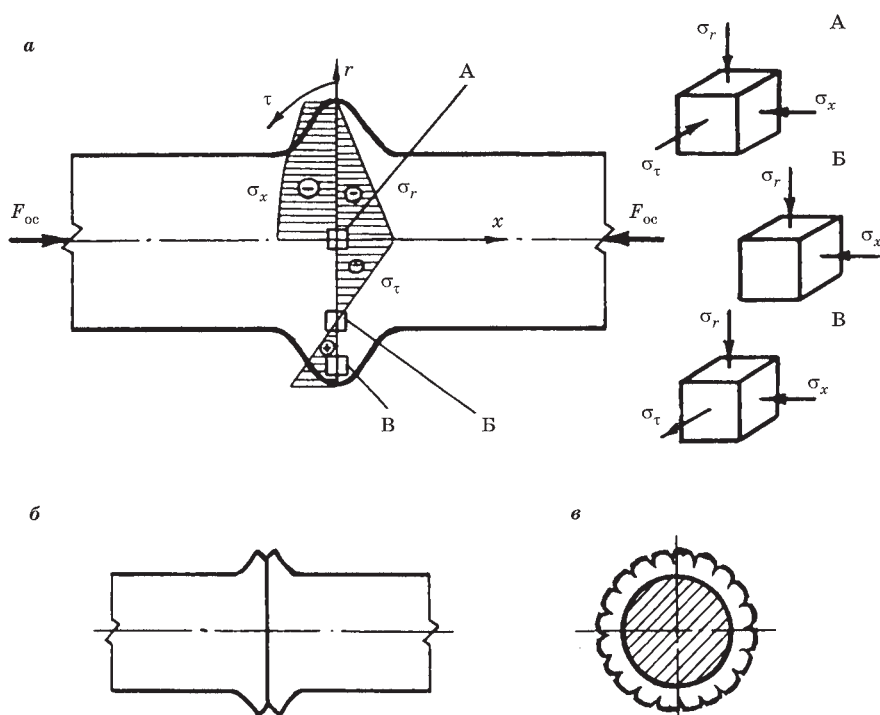


Рис. 10.4

Схема напряженного состояния металла в области стыка в процессе осадки: а — эпюры напряжений; б — раскрытие грата; в — возможные трещины в грате; x, r, τ — координаты; $F_{ос}$ — сила осадки; $\sigma_x, \sigma_r, \sigma_\tau$ — напряжения по направлению координат.

Режим охлаждения после осадки может оказать существенное влияние на структуру и механические свойства сварного соединения. Для закаливающихся сталей режим охлаждения необходимо оптимизировать, чтобы получить требуемый уровень прочности и пластичности в сварном соединении. Необходимые механические свойства сварного соединения можно получить его термической обработкой после сварки. Наиболее предпочтительной является термообработка сварного соединения в электродах машины сразу после его сварки и охлаждения. Выполняется данная термообработка повторным нагревом стыка за счет пропускания импульса тока. Температуру повторного нагрева необходимо поддерживать в требуемых пределах. Например, для отпуска закаленной углеродистой стали температура нагрева должна быть не выше температуры перлитного превращения (723°C), чтобы не вызвать повторной частичной закалки. Термообработка в электродах машины сокращает время на ее выполнение и повышает производительность. В других случаях термообработку выполняют в печи.

10.3. ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ ОПЛАВЛЕНИЕМ

Оплавление торцовых поверхностей деталей. Формирование сварного соединения будет рассмотрено применительно к стержням с одинаковой формой и размерами поперечных сечений из одноименного металла. Перед началом процесса сварки (п. 10.1) детали устанавливают в электродах машины с зазором, не превышающим 15% от припуска на оплавление, но исключая электрический контакт между их торцами. Затем на детали подают напряжение от источника сварочного тока. После подачи напряжения детали сближают с определенной скоростью, называемой скоростью оплавления $V_{\text{опл}}$. При сближении деталей происходит электрический контакт между поверхностями их торцов и начинается первая фаза процесса сварки — оплавление. На протяжении всего процесса оплавления подвижная деталь непрерывно перемещается в сторону неподвижной с заданной скоростью $V_{\text{опл}}$.

При сварке оплавлением процесс выделения тепла в области стыка является более сложным, чем при сварке сопротивлением. Это обусловлено многообразием процессов, происходящих в контакте деталь — деталь при протекании через него тока.

Процессы, протекающие при оплавлении в контакте деталь — деталь, являются циклическими и носят следующий характер.

Началом цикла является образование одного или нескольких твердых электрических контактов при касании торцов деталей (рис. 10.5а). Это достигается за счет малого давления оплавления $p_{\text{опл}}$, которое оценивается величиной порядка 10^{-2} МПа. Чтобы придать наглядность образованию единичных твердых контактов, микрошероховатость на торцах деталей (рис. 10.5) показана в утрированной форме.

Через образованный твердый контакт (контакты) начинает протекать ток, называемый током оплавления $I_{\text{опл}}$. Рассмотрим поведение единичного металлического контакта при протекании через него тока. Протекание тока характеризуется его высокой плотностью до 3000 А/мм^2 и интенсивным выделением тепла в контакте. Металл контакта быстро нагревается до расплавления.

На месте твердого контакта образуется жидкий мостик или жидкая перемычка (рис. 10.5б). Жидкая перемычка подвергается дальнейшему нагреву протекающим током и механическому воздействию со стороны сил поверхностного натяжения и комплекса электродинамических сил, возникающих от взаимодействия тока с собственным магнитным полем (рис. 10.5в). При сближении торцов со скоростью оплавления силы поверхностного натяжения стремятся увеличить диаметр перемычки.

В направлении радиуса жидкая перемычка подвергается сжатию электродинамическим давлением p_e (пинч-эффект). Давление p_e пропорционально квадрату тока, протекающего через перемычку. Под давлением сжатия жидкая перемычка утоняется в своей средней части. Утонение средней части токоведущей перемычки вызывает появление осевых (аксиальных) электродинамических сил $F_{\text{за}}$, направленных в обе стороны от ее середины к концам, которые стремятся разорвать перемычку вдоль оси.

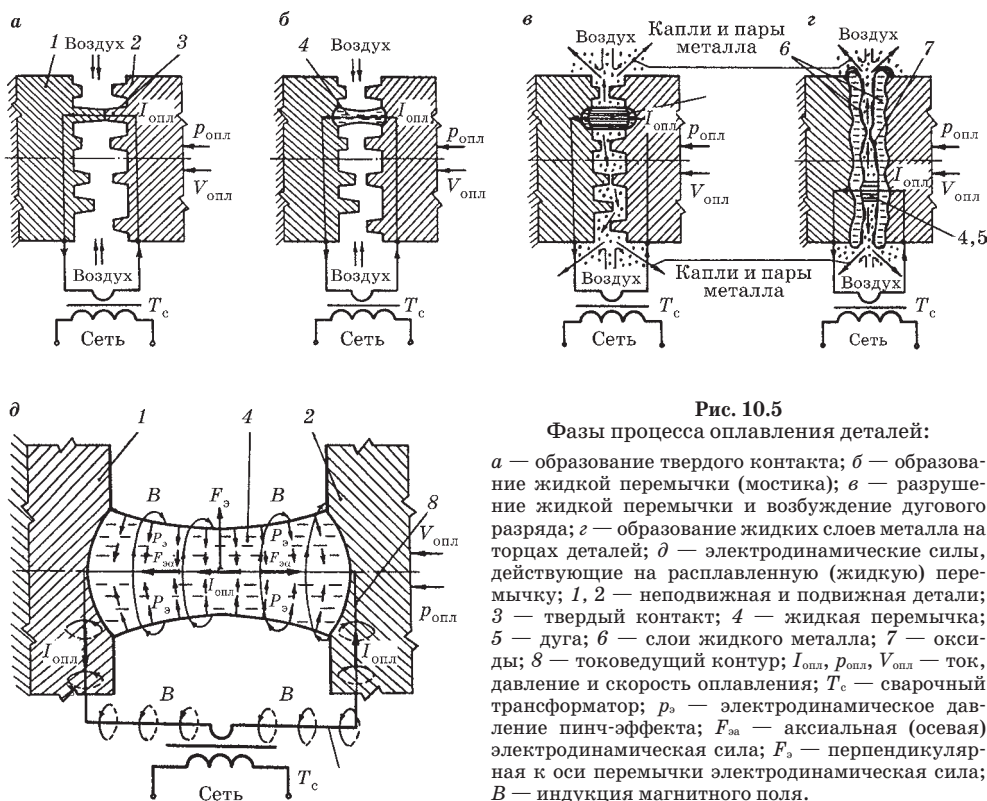


Рис. 10.5

Фазы процесса оплавления деталей:

а — образование твердого контакта; б — образование жидкой перемычки (мостика); в — разрушение жидкой перемычки и возбуждение дугового разряда; г — образование жидких слоев металла на торцах деталей; д — электродинамические силы, действующие на расплавленную (жидкую) перемычку; 1, 2 — неподвижная и подвижная детали; 3 — твердый контакт; 4 — жидкая перемычка; 5 — дуга; 6 — слои жидкого металла; 7 — оксиды; 8 — токоведущий контур; $I_{\text{опл}}$, $p_{\text{опл}}$, $V_{\text{опл}}$ — ток, давление и скорость оплавления; T_c — сварочный трансформатор; p_z — электродинамическое давление пинч-эффекта; $F_{\text{ос}}$ — аксиальная (осевая) электродинамическая сила; F_z — перпендикулярная к оси перемычки электродинамическая сила; B — индукция магнитного поля.

Кроме рассмотренных, на перемычку действует сила F_z , выталкивающая ее из токоведущего контура на периферию. Магнитное поле внутри токоведущего контура имеет более высокую индукцию (плотность), чем вне его. Стремясь расшириться, оно оказывает давление изнутри на все токоведущие элементы, в том числе и на жидкую перемычку, которая в силу своей эластичности получает при этом определенное перемещение.

Продолжающийся нагрев перемычки протекающим током увеличивает температуру металла до кипения. Совместное действие нагрева и электродинамических сил приводит к взрывообразному разрушению перемычки. Длительность существования перемычки оценивается временем 0,001...0,005 с. При взрыве перемычки образуются пары и мелкие капли металла, выбрасываемые из зазора с высокими скоростями (рис. 10.5в). На месте разрушившейся жидкой перемычки образуется дуговой или искровой разряд (рис. 10.5в). Это обусловливается тем, что токоведущая цепь имеет большую индуктивность, а при разрыве цепи с индуктивностью наводится электродвижущая сила самоиндукции, способная пробить образовавшийся зазор и возбудить дугу. Горение дуги продолжается до следующего замыкания контакта, так как подвижная деталь постоянно перемещается к неподвижной со скоростью оплавления. Малое сопротивление металлического контакта шунтирует дугу и она гаснет. Далее процесс повторяется по рассмотренной схеме.

После каждого взрыва перемычки (перемычек) на торцах деталей образуются кратеры (углубления) с некоторым объемом расплавленного металла. Кратеры, перекрываясь друг с другом, образуют очаги расплавленного металла, которые постепенно покрывают весь торец детали (рис. 10.5з). Поверхность расплавленного металла на торцах деталей имеет волнистую форму, которая образуется под действием высокого давления от взрыва перемычек и остающихся после этого кратеров разной глубины. Неровную поверхность имеет и твердый металл под расплавленным слоем. При появлении на торцах слоев расплава электрические контакты в зазоре между поверхностями деталей образуются путем замыкания как локальных выступов жидкой фазы, так и твердых микровыступов, как это происходит в начале процесса.

На протяжении всего процесса оплавления между торцами деталей сохраняется зазор, величина которого может достигать до нескольких миллиметров. Внутри зазора, как это рассмотрено ранее, образуются токоведущие каналы в виде металлических контактов (твердых и жидких) и дуговых и искровых разрядов. Каждый из данных токоведущих каналов имеет свое электрическое сопротивление.

Усредненное значение из данных сопротивлений называется контактным сопротивлением деталь — деталь $r_{\text{дд}}$, величина которого в микроомах определяется по эмпирической формуле, предложенной А. С. Гельманом:

$$r_{\text{дд}} = \frac{k_1 \cdot 9500}{(0,01S)^{2/3} \cdot (0,1V_{\text{опл}})^{1/3} \cdot j}, \quad (10.6)$$

где k_1 — коэффициент, для углеродистой стали $k_1 = 1,0$, для высоколегированной — $k_1 = 1,1$; S — поперечное сечение детали, мм²; $V_{\text{опл}}$ — скорость оплавления, мм/с; j — плотность тока, А/мм².

Формула (10.6) применима при следующих значениях: $S = 500 \dots 2500$ мм²; $V_{\text{опл}} = 0,3 \dots 3,5$ мм/с; $j = 8 \dots 30$ А/мм². Отклонение от приведенных значений снижает достоверность результата. Контактное сопротивление $r_{\text{дд}}$ находится в пределах 100...1500 мкОм, является наибольшим среди других сопротивлений зоны сварки (рис. 10.6) и мало меняется в процессе оплавления, в отличие от сварки сопротивлением (рис. 10.1в).

Постоянство и большая величина сопротивления $r_{\text{дд}}$ делают его основным источником выделения тепла при оплавлении. Тепло, выделенное на сопротивлениях деталей $2r_{\text{д}}$ и сопротивлениях электрод — деталь $2r_{\text{эд}}$, оказывает меньшее влияние на нагрев деталей.

Процесс нагрева деталей на стадии оплавления имеет ряд особенностей. Большое выделение тепла в узком зазоре на контактном сопротивлении $r_{\text{дд}}$ делает данный источник нагрева плоским, а зону нагрева — весьма локальной. При этом детали недостаточно прогреваются в глубину в пределах оптимального диапазона температур $T_{\text{мин}} \dots T_{\text{макс}}$ (рис. 10.2д). Наибольшая доля тепла отводится вглубь деталей от жидких перемычек за то время, пока они существуют до разрушения. Поэтому более длительное существование жидких перемычек интенсифицирует нагрев деталей.

Выделенное при оплавлении в контакте деталь — деталь тепло частично используется на нагрев деталей. Существенные потери данного тепла связаны

с выбрасыванием из контакта деталь — деталь высоконагретых паров металла и мелких капель. Частично тепло теряется в электроды. При условии однотипности материалов деталей, равенства их поперечных сечений и установочных длин выделение тепла и его отвод в электроды носит симметричный характер от зоны стыка. Это обуславливает формирование зоны максимальных температур в области стыка симметрично от его плоскости.

В конце оплавления твердый металл, примыкающий к расплавленному слою, перегрет до более высоких температур, чем рекомендованный максимум ($T_{\max} = 0,8...0,9 T_{\text{пл}}$). Однако данный металл будет выдавлен при осадке в грат, что повысит качество сварного соединения. Более существенным недостатком температурного поля является, как было отмечено ранее, узкая зона нагрева деталей. Увеличение ширины зоны нагрева будет осуществляться при осадке под током.

Потери металла при оплавлении приводят к уменьшению длины детали. Для сохранения номинальной длины сварной конструкции, длину каждой детали увеличивают на половину величины припуска на оплавление ($\Delta_{\text{опл}}/2$).

Образование *защитной атмосферы* в зазоре между торцами деталей и в окружающем стык пространстве связано с разрушением жидких перемычек. Образующиеся при взрыве перемычки пары и мелкие капли металла разлетаются под давлением до 3 МПа со скоростями более 60 м/с, вытесняя воздух из зазора между торцами и оттесняя его от стыка в целом. Разлетающиеся пары и капли металла также химически взаимодействуют с оставшимся кислородом, снижая этим его концентрацию. Разрушение перемычек носит циклический характер, поэтому за время пауз между их взрывами кислород успевает проникать в определенной степени в зазор и окислять металл, но интенсивность данного окисления существенно подавлена.

Для формирования более надежной защиты необходимо повысить интенсивность оплавления, т. е. увеличить частоту образования и разрушения перемычек за счет оптимизации параметров режима оплавления.

Наличие защитной атмосферы в зазоре и вокруг стыка при сварке *оплавлением* снижает окисление металла и является ее существенным отличием от сварки *сопротивлением*.

Главное влияние на качество сварного соединения оказывает наличие слоев расплавленного металла на торцах деталей (рис. 10.5г). В конце фазы оплавления расплавленный металл должен покрывать весь торец детали без отдельных очагов кристаллизации. Толщина расплавленного слоя колеблется

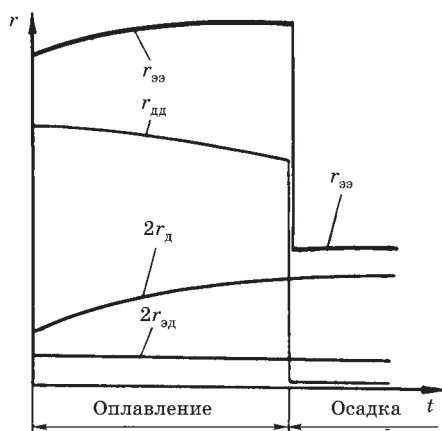


Рис. 10.6

Изменение сопротивлений при стыковой сварке оплавлением:

t — координата времени; $2r_{эд}$, $2r_{дд}$, $r_{дд}$, $r_{ээ}$ — сопротивления электрод — деталь, детали, деталь — деталь, электрод — электрод (зоны сварки).

в пределах от десятых долей до миллиметра. На металлах и сплавах с высокой теплопроводностью (алюминий и его сплавы) толщина данного слоя минимальна из-за большого теплоотвода в деталь. По этой же причине увеличивается вероятность появления очагов кристаллизации в расплавленном слое металла, что затрудняет выдавливание оксидов при осадке и снижает качество сварного соединения.

Удержание расплавленного металла на вертикальной поверхности торцов осуществляется силами поверхностного натяжения и частично электродинамической силой F_z (рис. 10.5*д*), которая смещает токоведущие расплавленные перемычки вверх. Достигая верхних границ торцов, перемычки разрушаются, образуя в данных местах наплывы расплавленного металла (рис. 10.5*е*). Не токоведущий расплавленный металл удерживается от стекания вниз только силами поверхностного натяжения. Ввиду малости этих сил удержать толстые слои расплавленного металла невозможно.

В процессе оплавления поверхность расплавленного металла непрерывно обновляется. Это приводит к существенному снижению расположенных на ней оксидных пленок, что облегчает формирование качественного сварного соединения при осадке.

Принципиально сварное соединение можно получить путем сближения оплавленных поверхностей деталей до полного соприкосновения так, чтобы зазор между ними исчез, а слой расплавленного металла в стыке остался. После кристаллизации прослойки расплавленного металла образуется сварное соединение с прочностью на уровне основного металла. Однако пластичность такого соединения является низкой. Это обуславливается наличием в закристаллизовавшемся металле оксидов, микротрещин, усадочных дефектов (раковин, рыхлот).

Качественное сварное соединение образуется только при полном выдавливании из стыка всей жидкой фазы вместе с оксидами и прочими загрязнениями в процессе осадки. Наличие слоев расплавленного металла облегчает выдавливание оксидов независимо от их агрегатного состояния (твердого или жидкого). Данное обстоятельство в совокупности с образующейся при оплавлении *защитной атмосферой* обуславливает высокое и стабильное качество сварных соединений при сварке *оплавлением* в отличие от сварки *сопротивлением*.

В процессе оплавления происходит выравнивание поверхностей торцов, если при заготовке деталей под сварку они получили какие-то значительные геометрические отклонения, например после рубки на ножницах или газовой резки.

Таким образом, в конце оплавления детали подготовлены к осадке: их торцовые поверхности *выровнены* и покрыты *слабоокисленными слоями расплавленного металла*, при этом получен определенный прогрев деталей вглубину, который будет усилен при осадке.

Данное состояние достигается после исчерпания всего припуска, отведенного на оплавление ($\Delta_{\text{опл}}$). Его величина определяется технологическими рекомендациями и зависит от материала и типа сечения детали. Например, для стержней из стали припуск на оплавление $\Delta_{\text{опл}}$ обеих деталей составляет $(0,4 \dots 0,9)d$, где d — диаметр стержня.

Контроль окончания процесса оплавления осуществляется как по перемещению подвижной детали на величину заданного припуска на оплавление, так и по времени оплавления с помощью аппаратуры управления. После оплавления начинается процесс осадки.

Осадка при стыковой сварке оплавлением. *Переход от оплавления к осадке* осуществляется путем резкого увеличения скорости сближения деталей, которая называется скоростью осадки $V_{ос}$. По величине скорость осадки на порядок превосходит конечную скорость оплавления.

При закрывании с высокой скоростью зазора между оплавленными торцами деталей происходит увеличение как количества одновременно образующихся в нем жидкометаллических контактов, так и суммарной площади их поперечных сечений. Плотность тока в жидких перемычках при этом падает и они перестают взрывообразно разрушаться, что приводит к исчезновению защитной атмосферы вокруг стыка и искро-дуговых процессов в зазоре, т. е. к прекращению процесса оплавления. Однако под действием *высокой скорости* осадки зазор быстро закрывается, предотвращая этим *окисление* расплавленного металла и его возможную *кристаллизацию* до момента полного выдавливания из стыка.

Выдавливание расплавленного металла после закрытия зазора между торцами позволяет вместе с ним легко выдавить находящиеся на его поверхности оксиды и прочие загрязнения, обеспечивая этим высокое качество сварного соединения. С другой стороны, жидкие слои металла при выдавливании создают плотный начальный контакт деталь — деталь, что также благоприятно влияет на качество соединения. После выдавливания жидкого металла процесс осадки протекает в объеме нагретого пластичного металла.

Контактное сопротивление деталь — деталь $r_{дд}$ при осадке исчезает, так как зазор между торцами деталей закрывается, и по всей площади поперечного сечения стыка образуется металлический контакт.

Исчезновение контактного сопротивления $r_{дд}$, которое по величине является наибольшим в зоне сварки (рис. 10.6), снижает общее сопротивление токоведущей цепи, что при неизменном вторичном напряжении источника питания сопровождается увеличением тока, протекающего через детали.

Повышенный ток, протекающий через детали в начале процесса осадки и называемый *током осадки* $I_{ос}$, обеспечивает дополнительный прогрев деталей вглубину от плоскости стыка. Ориентировочно ток осадки в 2...4 раза больше тока оплавления.

Длительность протекания тока осадки регламентируют так, чтобы обусловленный им дополнительный прогрев деталей позволил осуществить требуемую локальную пластическую деформацию с выдавливанием в грат объема металла, определяемого коэффициентом деформации (формула 10.5), что необходимо для формирования качественного сварного соединения. Более длительное протекание тока осадки расширяет зону перегрева и пережога металла.

Выдавливание из стыка при осадке пластичного металла, помимо расплавленного, является обязательным. Твердая поверхность металла под расплавленным слоем имеет местные углубления (кратеры), полученные от взрывов жидких перемычек разных размеров (рис. 10.7а). Глубина кратеров доходит до 3...4 мм.

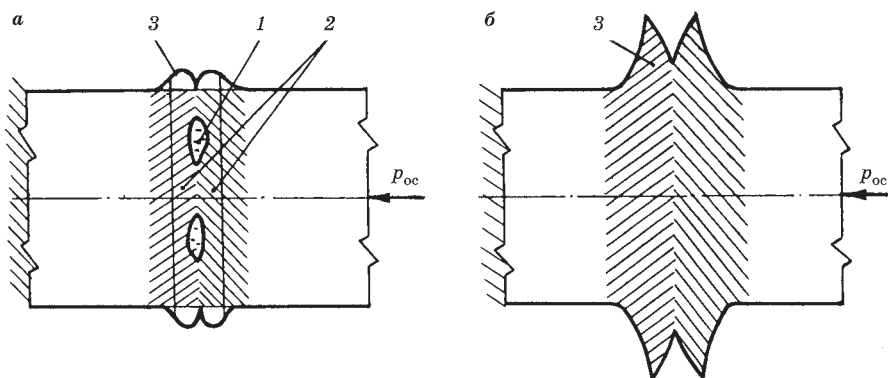


Рис. 10.7

Осадка деталей при сварке оплавлением:

a — неполное выдавливание жидкого металла; *б* — форма сварного соединения после оптимальной осадки; 1 — жидкий металл в закрывшихся кратерах; 2 — слои пережженного и перегретого металла; 3 — грат; p_{oc} — давление осадки.

Жидкий металл, который остается в замкнутых кратерах, необходимо выдавить, так как в нем содержатся оксиды и после кристаллизации возможно образование раковин, пор и микротрещин. Выдавить локальные объемы расплавленного или уже закристаллизовавшегося металла можно только вместе с пластичными слоями, в которых металл может быть в состоянии перегрева или пережога.

Выдавливание металла из стыка в грат сопровождается укорочением свариваемых деталей. Чтобы длина сварного изделия после осадки соответствовала номинальному значению, в свариваемых деталях предусматривают припуск на осадку Δ_{oc} , т. е. каждая деталь имеет припуск $\Delta_{oc}/2$.

Величина припуска на осадку определяется типом металла и формой поперечного сечения детали. Например, для стальных стержней диаметром $d < 50$ мм припуск на осадку для обеих деталей применяют равным $\Delta_{oc} = (0,1 \dots 0,4)d$, причем для малых диаметров коэффициент выбирают ближе к верхнему пределу.

Процесс осадки принято делить на осадку *под током* и осадку *без тока*. В соответствии с этим общий припуск на осадку включает в себя припуск на осадку под током, после исчерпания которого ток осадки выключается и дальнейшее выдавливание металла происходит в объеме припуска на осадку без тока. Осадку под током контролируют как величиной отведенного на это припуска, так и длительностью протекания тока осадки, в зависимости от типа аппаратуры управления контактной машиной.

После завершения осадки грат, как правило, имеет раздвоенную форму с острыми кромками (рис. 10.7 б). Равномерная форма грата по периметру стыка является признаком хорошего качества соединения, как и при сварке сопротивлением (рис. 10.2в). Грат может срезаться в процессе осадки (рис. 10.3г).

Локальный характер пластической деформации металла в области стыка обусловлен его концентрированным нагревом от плоского источника, действующего в контакте деталь — деталь.

В конце оплавления температурный интервал пластической деформации $T_{\min}...T_{\max}$ имеет ограниченную ширину (рис. 10.2*д*, кривая 4), что исключает проведение осадки с полным выдавливанием из стыка оксидов, перегретого и пережженного металла. Подогрев металла током осадки расширяет зону температурного интервала $T_{\min}...T_{\max}$ до оптимальной ширины, обеспечивая этим интенсивное радиальное течение металла (рис. 10.1*б*) и выдавливание в грат оксидов, ухудшающих качество сварного соединения.

Пластическая деформация металла при осадке происходит под действием давления осадки $p_{\text{ос}}$.

При задании параметров процесса стыковой сварки удобнее использовать *давление*, т. к. оно не зависит от площади сечения детали. С другой стороны, при сварке детали определенного сечения контактную машину необходимо настроить на требуемую *силу осадки*, которая определяется по заданному давлению осадки и сечению детали.

Давление осадки $p_{\text{ос}}$ зависит от типа металла или сплава, температуры нагрева (его сопротивления пластической деформации) и от степени и скорости его пластической деформации — скорости осадки. С ростом скорости осадки давление возрастает и для широкого круга материалов находится в пределах 100...400 МПа.

Формирование металлической связи между атомами в области стыка после завершения осадки, процессы рекристаллизации металла, искривление волокон в области стыка, характер напряженного состояния при осадке и необходимость контроля режима охлаждения после осадки аналогичны рассмотренным при стыковой сварке сопротивлением (рис. 10.2, 10.3, 10.4).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сопротивления зоны сварки и их физическая сущность при стыковых способах сварки.
2. Какими процессами определяется температурное поле в области стыка при нагреве?
3. Требования к нагреву деталей при стыковой сварке.
4. Влияние окисления металла на качество соединения при стыковой сварке.
5. Роль осадки в формировании сварного соединения при стыковой сварке.
6. Какие связи определяют неразъемность стыкового соединения?
7. Разновидности осадки при стыковой сварке.
8. Каким по форме должен быть характер пластической деформации в стыке? Почему?
9. Влияние процесса рекристаллизации на качество стыкового соединения.
10. Влияние искривления волокон в области стыка на качество стыкового соединения.
11. Для чего необходимо оплавление при стыковой сварке?
12. Какая разновидность стыковой сварки обеспечивает более высокое качество соединения? Почему?

11.1. КОНСТРУИРОВАНИЕ УЗЛОВ И ПОДГОТОВКА ДЕТАЛЕЙ К ТОЧЕЧНОЙ (ШОВНОЙ) СВАРКЕ

Технологичность спроектированного сварного узла — обязательное требование современного производства. Она включает правильный выбор материала, размеров и формы деталей, рациональных способов их изготовления, сборки и сварки, а также необходимых послесварочных операций (правки, антикоррозионной защиты).

Точечной сваркой можно сваривать детали из большинства известных конструкционных материалов: низкоуглеродистых, среднеуглеродистых и низколегированных сталей, легированных коррозионно-стойких и жаропрочных сталей, алюминиевых и магниевых сплавов, титана и его сплавов, некоторых медных сплавов и ряда других материалов.

Лучше всего свариваются между собой одноименные металлы и сплавы, построенные на одной основе или имеющие разную основу, но образующие между собой ряд твердых растворов. Например, аустенитные стали хорошо свариваются с углеродистыми, коррозионно-стойкие стали — с жаропрочными. Никель сваривают с низколегированными сталями и коррозионно-стойкими. Все чаще точечной сваркой соединяют металлы с антикоррозионными и декоративными покрытиями.

Наиболее широко точечной сваркой соединяют детали, собранные в нахлестку из заготовок, выштампованных из листового и вырезанных из профильного проката. Точечную сварку можно использовать для создания комбинированных конструкций, в которых заготовки из листового проката необходимо сваривать с деталями, изготовленными методами резания, литья,ковки и высадки.

Как правило, точечной сваркой соединяют детали толщиной 0,3...6,0 мм. При микросварке толщина привариваемых элементов составляет 20...50 мкм. Обычно в машиностроении сваривают детали равных толщин или с соотношением толщин не более 1 : 3 (при толщине тонкой детали 0,5...1,5 мм), в приборостроении соотношение толщин соединяемых элементов может достигать 1 : 100.

При проектировании сварной конструкции, выполняемой точечной (шовной) сваркой, желательно обеспечить:

- свободный доступ электродов к месту сварки, позволяющий использовать прямые электроды с внутренним охлаждением и стандартное сварочное

оборудование (рис. 11.1а, б); возможно, но нежелательно использование фигурных электродов (рис. 11.1в);

- минимальную и неизменную массу деталей из ферромагнитного материала, вводимую в контур сварочной машины, так как ее наличие ведет к увеличению сопротивления контура и снижению силы тока при сварке на переменном токе;
- минимально возможные зазоры между деталями за счет повышения точности заготовок, фиксирующих приспособлений и качества сборки деталей в местах их сопряжения под сварку;
- необходимые размеры внутренних полостей узлов для введения в них токоподводящих консолей и электродов (рис. 11.1г):

$$d = \sqrt[3]{1,2lF_{\text{сж}}} \text{ и } bh^2 = 0,8lF_{\text{сж}},$$

где $F_{\text{сж}}$ — сила сжатия электродов, даН; l — длина детали (или вылет токоподводящей консоли), мм; при невозможности введения электрода внутрь полого тонкостенного профиля целесообразно использовать медные раздвижные вставки (рис. 11.1д).

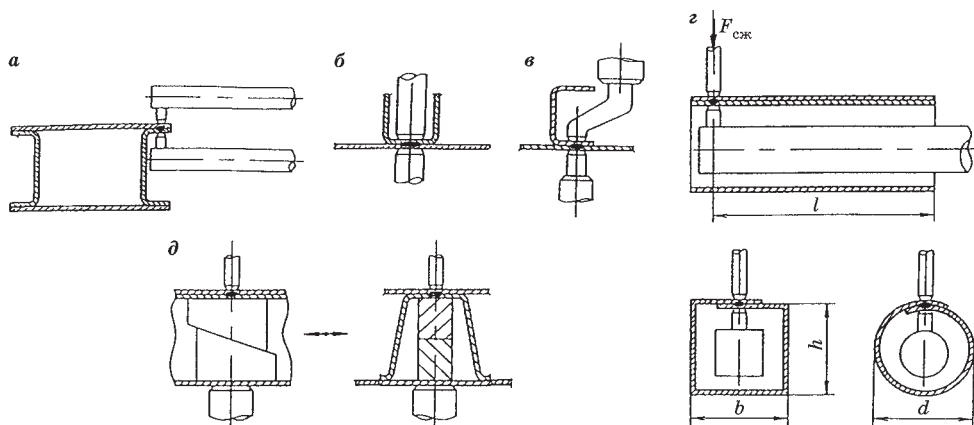


Рис. 11.1

Примеры узлов, выполненных точечной контактной сваркой

Технологический процесс производства сварной конструкции состоит из следующих основных операций: изготовление заготовок и деталей, подготовка поверхности деталей под сварку, сборка и прихватка, собственно сварка, правка и механическая доработка, антикоррозионная защита, термическая обработка и контроль качества. В зависимости от серийности производства, его технического уровня, ответственности узлов и условий их эксплуатации, последовательность и количество операций могут корректироваться и окончательно определяются рабочим технологическим процессом (маршрутной технологией и операционными картами). Большинство из перечисленных операций являются типовыми для точечной, шовной и рельефной сварки.

Точность изготовления заготовок и деталей существенно влияет на процесс образования и качество сварных соединений. Раскрой заготовок из листа осуществляется на гильотинных и дисковых ножницах, реже в штампах или с использованием кислородной резки. Для механизированного раскроя листов из цветных металлов, высоколегированных сталей и титана используют плазменную и лазерную резку, обеспечивающие наилучшие показатели скорости и качество реза. Заготовки из профильного проката нарезают пилами, пресс-ножницами, реже — кислородной резкой.

Формообразование деталей из листовой заготовки и профильного проката выполняют различными видами холодного деформирования (штамповкой, гибкой и т. п.).

Подготовка поверхности деталей проводится с целью удаления загрязнений и поверхностных оксидных пленок, которые могут вызвать появление в сварном соединении неметаллических включений, образование раковин, пор и трещин в металле ядра и на поверхности деталей, выплески металла из зоны сварки, подгар и подплавление поверхности деталей, повышение уровня нагрева электродов и, соответственно, снижение стойкости их рабочей части. Прямым следствием указанных дефектов является понижение прочности и коррозионной стойкости соединения.

Выбор способа подготовки поверхности деталей зависит от свариваемого материала, исходного состояния поверхности заготовки, толщины металла и размера детали, а также от типа производства и требований к качеству соединений.

Подготовка поверхности деталей, общая или местная, включает следующие операции: обезжиривание, механическую обработку или химическое травление, пассивирование, нейтрализацию, промывку, сушку и контроль.

В большинстве случаев объективной характеристикой качества подготовки поверхности деталей под контактную сварку является величина электросопротивления холодных деталей $r_{\text{х}}$ — для сталей не более 800 мкОм, для алюминиевых сплавов — 100 мкОм. Сопротивление измеряют микроомметром или методом амперметра-вольтметра, используя специальный пресс или непосредственно в электродах сварочной машины. При этом материал электродов, форма, размеры их рабочей поверхности и сила сжатия должны соответствовать условиям сварки данных деталей.

Химические способы подготовки поверхности особенно эффективны в крупносерийном и массовом производстве ответственных деталей, поскольку они позволяют получить чистые поверхности с низким и стабильным значением контактных сопротивлений практически для всех металлов и сплавов. Химическая обработка поверхности деталей проводится в соответствии с производственной инструкцией, которая рекомендует последовательность операций, состав растворов и их температуру. Например, для конструкционных среднелегированных и хромистых сталей проводится:

- обезжиривание при температуре 60...80°C в водном растворе 40...60 г тринатрийфосфата, 20...35 г соды, 30...50 г едкого натра (здесь и далее указывается состав на 1 л водного раствора);
- промывка в горячей (45...50°C), а затем в холодной проточной воде;

- травление в водном растворе 125...250 г серной кислоты, 20...30 г хлористого натрия, 5...8 г присадки 4М;
- нейтрализация в водном растворе 50...70 г едкого натра или калия при температуре 20...25°C.

Для алюминиевых сплавов после травления в водном растворе едкого натра (4...6 г, температура 35...50°C), промывки и осветления в растворе азотной кислоты (200...300 г) обязательно включается операция пассивации в водном растворе ортофосфорной кислоты (50...120 г) и калиевого хромпика (0,5...1,4 г) с последующей промывкой, обеспечивающей возможность более длительного хранения деталей перед их сваркой.

Механическую подготовку поверхности проводят дробеструйной (пескоструйной) обработкой или зачисткой металлическими щетками и абразивными кругами. Дробеструйную обработку проводят при наличии на деталях слоя окарины или прочной оксидной пленки. Детали из стали и титановых сплавов обрабатывают металлической дробью, алюминиевые и магниевые сплавы — стеклянными шариками. Остатки дроби и продуктов обработки удаляют с нахлестки деталей салфеткой, смоченной в растворителе, или обдувают сухим воздухом. Зачистку металлическими вращающимися щетками и абразивными кругами на вулканитовой основе или войлочными кругами с абразивом чаще всего применяют для сталей (в том числе для жаропрочных, высокопрочных и жаростойких сплавов). Алюминиевые и магниевые сплавы подвергают местной очистке быстро вращающейся стальной щеткой или мелким наждачным полотном (шкуркой) с ограничением силы прижатия зачистного инструмента, чтобы избежать глубоких повреждений поверхности металла. После механической обработки срок хранения деталей до сварки не должен превышать 2...3 ч из-за высокой химической активности свежезачищенной поверхности.

Основная задача сборки заключается в обеспечении необходимой точности взаимного расположения деталей, входящих в свариваемый узел, в соответствии с требованиями, изложенными в конструкторско-технологической документации на сборку — сварку. В общем случае выполняется предварительная сборка и подгонка, контроль собранного узла и прихватка деталей. При сварке изделий, деталей которых не требуют подгонки и полностью взаимозаменяемы, предварительная сборка отсутствует. Точность сопряжения деталей обеспечивается при сборке по разметке, с применением шаблонов, фиксаторов, упоров и струбцин. Сложные узлы собирают в специализированных сборочно-сварочных кондукторах.

С позиции обеспечения качества сварки особое внимание должно быть уделено уменьшению зазоров между деталями. При больших и нестабильных по величине зазорах увеличивается деформация сваренного узла и снижается стабильность качества из-за колебания фактической силы сжатия в зоне сварки. Чем жестче детали и узел, тем точнее должны быть детали и их сборка. Допускаемые зазоры зависят также от режимов сварки и шага прихватки. Например, после сборки и прихватки деталей из стали толщиной 1 мм, зазоры должны быть не более 0,4 мм на длине 100 мм и 1,2 мм на длине 300 мм. Для толщины 3 мм эти значения уменьшаются соответственно до 0,3 и 0,9 мм. В общем случае, для листовых конструкций толщиной до 1 мм, зазоры между деталями в местах сварки должны выбираться нажатием руки (10 даН), а для

более жестких узлов — устраняться силой, не превышающей 10% силы сжатия электродов при сварке.

Прихватка собранных деталей должна обеспечить полное закрепление деталей с сохранением основных размеров свариваемого узла после выемки его из приспособления и снятия фиксаторов.

Количество прихваточных точек, расстояние между ними и порядок прихватки следует предусматривать в технологических картах с целью получения наименьшего коробления изделия. Чем больше жесткость деталей и меньше зазоры при сборке, тем больше может быть шаг между прихватками. Под точечную сварку шаг прихваточных точек составляет 100...300 мм, а режим прихватки аналогичен режиму сварки. Шаг прихватки под шовную сварку во избежание коробления узла уменьшают до 30...80 мм; прихватку производят на режимах со сниженной на 10...15% силой сварочного тока.

Протяженные швы прихватывают от центра к краям попеременно, начиная сварку с участков повышенной жесткости (вблизи ребер, на закруглениях и т. д.). Обечайки прихватывают попеременно точками, расположенными диаметрально противоположно.

Простые узлы, зафиксированные по сборочным отверстиям и упорам в приспособлениях, обычно сваривают без прихватки на стационарных машинах.

11.2. ЦИКЛОГРАММЫ, ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА И УСЛОВИЯ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

11.2.1. РАЗНОВИДНОСТИ СХЕМ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ И ЦИКЛОГРАММ ПРОЦЕССА

Наиболее широко в промышленности применяется схема *двусторонней однотоочечной сварки*, представленная на рисунке 11.2. Кроме этой базовой, находят применение и другие схемы процесса точечной сварки:

- односторонняя однотоочечная (рис. 11.3б);
- односторонняя двухточечная (рис. 11.3в, г);
- двусторонняя двухточечная (с двумя трансформаторами, рис. 11.3д);
- односторонняя многотоочечная (рис. 11.3е).

Одностороннюю сварку одно- двух- и многотоочечную применяют в тех случаях, когда не возможен или ограничен двусторонний подход электродов к месту соединения (например, для крупногабаритных узлов). Чаще всего, одностороннюю сварку выполняют с использованием токопроводящей медной подкладки (рис. 11.3г). При значительной разнице толщин свариваемых деталей (1 : 3 и более) и шаге между точками более 40 мм возможна сварка без подкладки, если жесткость деталей достаточна для восприятия $F_{св}$ (рис. 11.3в). При этом более тонкий лист желательно располагать со стороны электродов. Иногда используют одностороннюю однотоочечную сварку с холостым электродом (рис. 11.3б).

При односторонней сварке с подкладкой ток, протекающий по верхнему листу (ток шунтирования), осложняет процесс односторонней сварки, вызывая перегрев металла в контактах электродов с верхней деталью, что увеличивает вероятность образования выплесков и снижает стойкость электродов. Ток

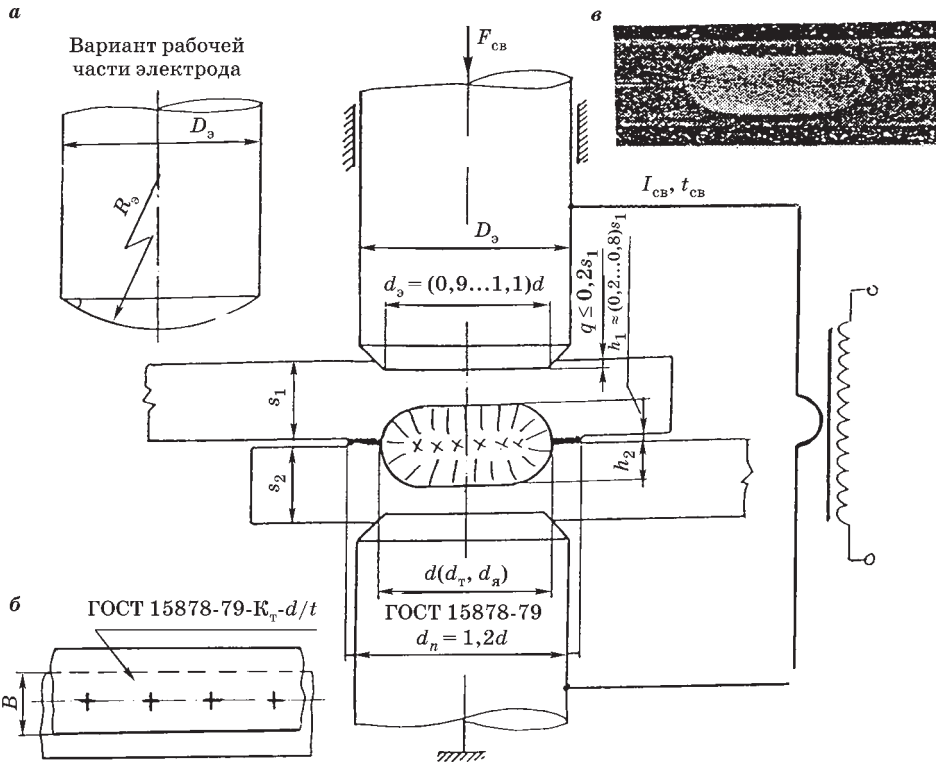


Рис. 11.2

Схема односторонней двусторонней сварки с конструктивными размерами соединения (а), обозначение его на чертежах (б) и макрошлиф сварной точки (в)

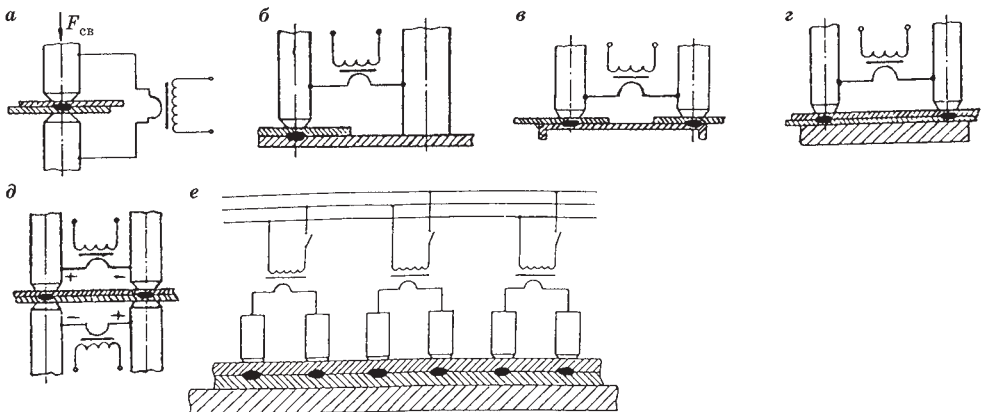


Рис. 11.3

Разновидности схем точечной сварки:

а — базовая односторонняя двусторонняя; б — односторонняя односторонняя; в — двухточечная односторонняя; г — двухточечная односторонняя на медной подкладке; д — двухточечная двусторонняя; е — многоточечная односторонняя на медной подкладке.

пунтирования уменьшается при увеличении удельного сопротивления свариваемого металла, расстояния (шага) между электродами и уменьшении толщины верхней детали менее 2 мм. Односторонняя сварка деталей из легких сплавов, латуни и бронзы не применяется.

Для формирования качественного соединения при точечной сварке необходимо осуществить определенную последовательность операций (сжатие деталей в месте сварки, пропускание сварочного тока, проковку соединения после выключения тока), описываемых циклограммой процесса сварки. Основным технологическим вариантом циклограммы является одноимпульсная сварка с постоянной силой сжатия (рис. 11.4а). Цикл сварки с приложением ковочной силы $F_k = (2...5) \cdot F_{св}$ (рис. 11.4б) используют при сварке алюминиевых и магниевых сплавов толщиной более 1,5 мм, при сварке жаропрочных сплавов, а также углеродистых сталей большой толщины для устранения усадочных дефектов. В зависимости от марки материала, его толщины и динамических свойств привода сжатия время включения силы проковки по отношению к началу пропускания сварочного тока выбирают равным $t_k = (1,1...1,5) \cdot t_{св}$; при меньшем времени t_k возможен выплеск металла из ядра, при большем — ядро успевает закристаллизоваться и приложение ковочной силы неэффективно. При сварке высокопрочных легких сплавов и сталей большой толщины, деталей с предварительно нанесенным жидким покрытием (клеем, грунтом) для устранения зазоров и предупреждения начальных выплесков, применяют циклограмму (рис. 11.4в) с предварительным обжатием $F_{обж}$ и проковкой F_k .

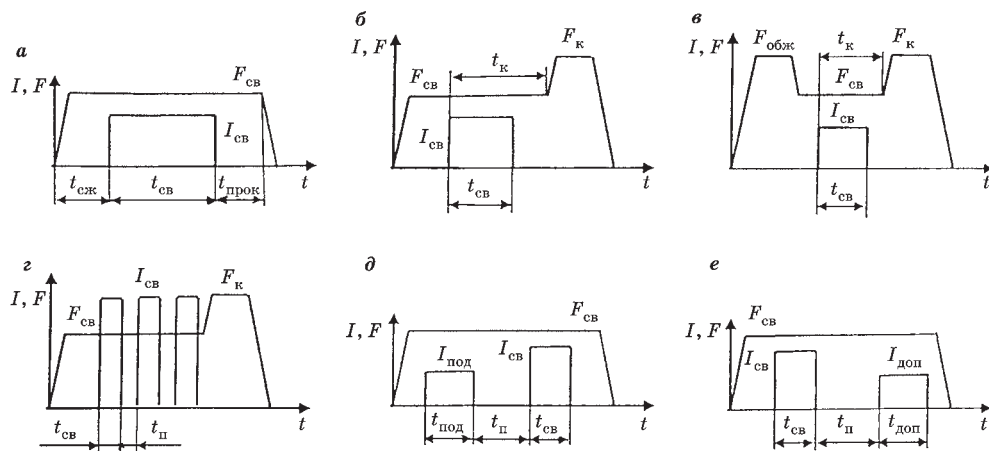


Рис. 11.4
Типовые циклограммы процесса точечной сварки

Для сварки стали толщиной более 5 мм целесообразно использовать многоимпульсную сварку с приложением ковочной силы (рис. 11.4г). Такой цикл сварки снижает вероятность образования выплесков, способствует лучшему уплотнению металла ядра, улучшает охлаждение электродов и уменьшает их износ.

При сварке жаропрочных сплавов и для устранения сборочных зазоров при сварке жестких конструкций используют цикл сварки с предварительным

подогревающим импульсом тока (рис. 11.4д), а для сварки закаливающих сталей применяют последующий дополнительный импульс тока — термообработку в электродах контактной машины в сочетании с любой циклограммой силы (рис. 11.4е).

11.2.2. ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА И УСЛОВИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ, КРИТЕРИИ ИХ ВЫБОРА

Основными параметрами режима, позволяющими управлять температурными и деформационными полями в зоне сварки, являются: величина и форма импульса сварочного тока, сила сжатия деталей и время их действия. Кроме основных параметров режима, результаты точечной сварки зависят также от условий выполнения процесса, включающих в себя: материал, размеры и форму рабочей части электродов, наличие экранов (прокладок) между электродами и свариваемыми деталями, полярность импульса сварочного тока и др.

Рассмотрим, из каких соображений устанавливаются величины указанных параметров режима и условия точечной сварки.

Конструктор, зная назначение и эксплуатационные характеристики свариваемого узла, указывает материал и толщину деталей в месте соединения, формулирует требования к соединению и, пользуясь ГОСТ 15878-79, назначает диаметр точек $d_{\text{мин}}$, указывает их количество и расположение.

Технолог назначает диаметр точки $d_{\text{ном}} = (1,15 \dots 1,25) \cdot d_{\text{мин}}$, обеспечивающий компенсацию случайных производственных факторов, выбирает параметры режима ($I_{\text{св}}$, $F_{\text{св}}$, $t_{\text{св}}$) и условия сварки, определяющие получение $d_{\text{ном}}$ и выполнение заданных требований.

Многочисленные исследования показали, что прочность соединения, выполненного точечной сваркой, пропорциональна диаметру точки в степени 1,7...1,9, а величина проплавления в пределах 20...80% не оказывает на прочность существенного влияния. Таким образом, критерием для выбора параметров режима является обеспечение необходимого диаметра точки ($d_{\text{ном}}$) при отсутствии выплесков и других недопустимых дефектов. На рисунке 11.5 показан

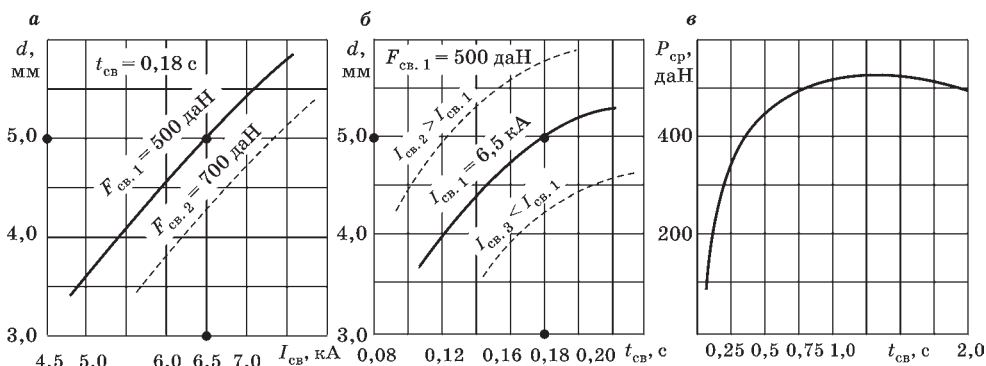


Рис. 11.5

Зависимость диаметра точки от $I_{\text{св}}$, $F_{\text{св}}$ (а) и $t_{\text{св}}$ (б) при сварке стали 12Х18Н10Т толщиной 1,2 мм, а также прочности на срез одноточечных соединений из низкоуглеродистой стали толщиной 1 мм от $t_{\text{св}}$ (в)

характер влияния $I_{\text{св}}$, $F_{\text{св}}$, $t_{\text{св}}$ на диаметр точки при сварке стали 12Х18Н10Т толщиной 1,2 мм электродами со сферической рабочей частью ($R_{\text{эл}} = 75$ мм).

На выбор конкретных величин параметров и условий сварки влияют:

- толщина свариваемых деталей;
- теплофизические характеристики свариваемого материала ($T_{\text{пл}}$, ρ , λ , σ_{02}^T);
- возможная реакция свариваемого материала на нагрев и охлаждение при контактной сварке;
- особенности конструкции соединения, такие как разная толщина деталей, разноименные металлы, сварка пакета из более 2-х деталей, наличие покрытий на свариваемых деталях.

Величина сварочного тока в значительной степени зависит от удельного электросопротивления свариваемых деталей (ρ , мкОм·м). Чем оно меньше (например, у алюминиевых и магниевых сплавов), тем больше необходим сварочный ток. Для определения его величины можно воспользоваться:

- данными отраслевых нормативных материалов (опытом предыдущих поколений) в виде таблиц, графиков, номограмм, эмпирических выражений — например, выражением для определения величины сварочного тока, предложенным К. А. Кочергиным:

$$I_{\text{св}} = (120 \dots 170) d_{\text{ном}} / \sqrt{\rho_{\text{т}}},$$

- где $I_{\text{св}}$, А; $d_{\text{ном}}$, см; $\rho_{\text{т}}$, Ом·см;
- расчетами сварочного тока по приближенным моделям на базе теплового баланса в зоне соединения, предложенным А. С. Гельманом (методику расчета см. в главе 9) или Н. Л. Кагановым;
- результатами лабораторных экспериментальных исследований;
- решением обратной электро-термодеформационной задачи, позволяющим по предварительно заданным параметрам режима ($I_{\text{св}}$, $F_{\text{св}}$, $t_{\text{св}}$), толщине и теплофизическим характеристикам свариваемого материала, размерам и свойствам электродов, условиям на границах электрод — деталь определить положение изотермы $T_{\text{пл}}$, т. е. размеры и положение расплавленного ядра. Путем решения этой задачи можно найти параметры режима и условия сварки, удовлетворяющие требуемым размерам диаметра точки и ее расположения относительно плоскости соединения.

Нагрев при контактной точечной сварке может осуществляться *импульсами тока* различной формы в зависимости от типа сварочной машины (рис. 11.6). Выбор необходимой формы импульса тока определяется теплофизическими свойствами, толщиной металла и размерами свариваемых деталей. Каждый импульс сварочного тока характеризуется определенными параметрами. У машин переменного тока (рис. 11.6а, б) — действующим значением тока $I_{\text{св}}$, временем включения $t_{\text{св}}$, а также длительностью нарастания $t_{\text{нар}}$ и спада тока $t_{\text{сп}}$ для модулированного импульса. У низкочастотных машин (рис. 11.6в) — максимальным значением тока $I_{\text{св.мах}}$, временем достижения максимального значения $t_{\text{св}}$, а при наличии дополнительного импульса тока (рис. 11.6г) — максимальным значением дополнительного тока $I_{\text{доп.мах}}$ и временем дополнительного импульса $t_{\text{доп}}$. У машин с выпрямлением в сварочном контуре (рис. 11.6д) максимальным (средним) значением выпрямленного тока и длительностью импульса.

У конденсаторных машин (рис. 11.6е), кроме максимального значения тока и времени его достижения, определяют длительность импульса $t_{0,5I_{\max}}$ в момент достижения на ветви спада тока величины, равной $0,5 \cdot I_{\max}$.

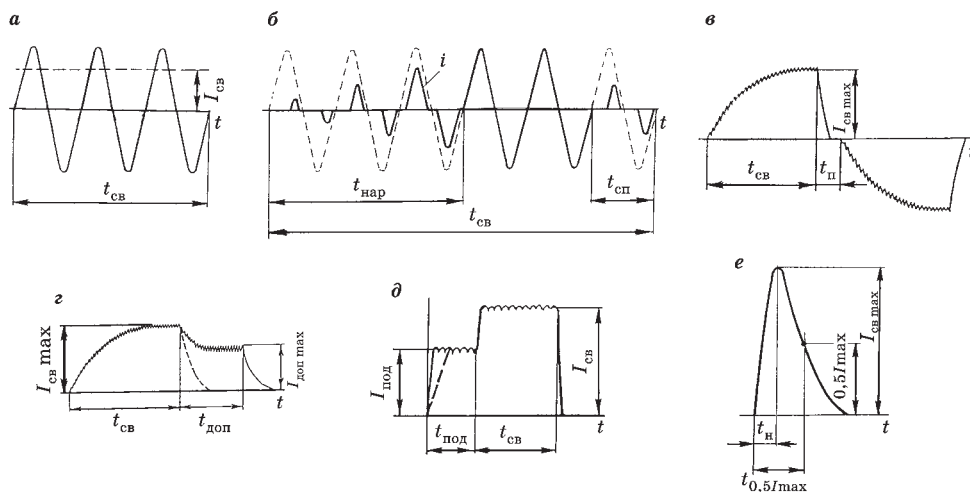


Рис.11.6

Формы импульсов сварочного тока различных типов контактных машин

Время сварки ($t_{св}$, с) определяется теплопроводностью и сопротивлением пластической деформации свариваемого материала при повышенной температуре.

Существует эмпирическая зависимость $t_{св} = k_t \cdot s$, где k_t — коэффициент, зависящий от материала и толщины детали, с/мм; s — толщина одной (более тонкой) детали, мм.

Алюминиевые, магниевые и медные сплавы из-за их высокой теплопроводности предпочтительно сваривать при малом времени действия тока — $k_t = 0,05...0,12$.

Низкоуглеродистые стали, имеющие умеренную теплопроводность и невысокую прочность при повышенных температурах, свариваются в широком диапазоне времени сварки: $k_t = 0,08...0,32$.

Жаропрочные сплавы, высокопрочные низколегированные стали, сваривают при большой длительности тока: $k_t = 0,25...0,55$. Для толщин $0,5...1,5$ мм величину k_t следует выбирать ближе к верхнему пределу, для толщин $2...4$ мм — ближе к нижнему. При выборе k_t также следует учитывать требуемую производительность и мощность сварочной машины.

Регулируя силу сварочного тока и время его действия, получают жесткий или мягкий режим сварки. Жесткий режим характеризуется кратковременным импульсом тока большой силы. Температурное поле в этом случае определяется в основном тепловыделением, т. е. в большей степени зависит от распределения плотности тока и мало зависит от условий теплоотвода. Суммарные потери тепла в электроды и металл, окружающий литое ядро, составляют менее 20% от выделяющейся в зоне сварки энергии $Q_{св}$. Для жесткого режима характерна высокая скорость нагрева и охлаждения.

Высокая скорость нагрева приводит к наружным и внутренним выплескам, для предотвращения которых целесообразно повышать сварочную силу и использовать машины с высокими динамическими свойствами привода сжатия. При сварке закаливающихся сталей высокая скорость охлаждения способствует появлению закалочных структур в ядре, и, что более опасно, в зоне термического влияния в непосредственной близости от ядра, которая одновременно является и зоной концентрации напряжения. Опасность этого явления можно снизить, используя дополнительный импульс сварочного тока (рис. 11.4е) для термической обработки (отпуска) соединения между электродами контактной машины.

При сварке на жестком режиме литое ядро расположено более симметрично относительно плоскости соединения деталей. Особенно важно это использовать для улучшения формирования соединения при сварке деталей с большим отношением толщин и для металлов с резко различными теплофизическими свойствами. Из-за незначительного теплоотвода в электроды при сварке на жестких режимах растет высота литого ядра, уменьшается вмятина на поверхности деталей и повышается стойкость электродов.

Мягкие режимы характеризуются большой длительностью протекания тока относительно малой величины. При этом происходит значительный теплообмен в зоне сварки и потери теплоты в электроды и массу деталей могут превышать 80% от $Q_{\text{зс}}$. Чем мягче режим сварки, тем больше зона термического влияния, и следовательно, больше тепловые деформации, коробления и рост зерна.

Сила сжатия при сварке $F_{\text{св}}$ зависит от сопротивления металла пластической деформации, его толщины и жесткости режима сварки. Если $F_{\text{св}}$ значительно меньше своего оптимального значения, велика вероятность появления систематических выплесков металла из междueleктродной области, образование в ядре усадочных дефектов, снижение стабильности размеров литого ядра и прочности соединения, приваривание (прилипание) электродов к поверхности детали и уменьшение срока их службы.

Статистическая обработка опытных данных позволяет представить зависимость $F_{\text{св}}$ от толщины металла s в диапазоне 0,5...3,0 мм, в виде линейной функции $F_{\text{св}} = k_F \cdot s$, где k_F — коэффициент, зависящий от материала и жесткости режима сварки, даН/мм. Обычно на стадии «Сварка» для базовой циклограммы процесса (рис. 11.4а) $k_F = 100...350$ для низкоуглеродистых сталей; 350...500 — для низколегированных, углеродистых и коррозионно-стойких сталей; 650...1000 — для жаропрочных сплавов; 220...250 — для алюминиевых и магниевых сплавов. Большие значения k_F следует выбирать для жестких режимов и для деталей большей толщины.

11.2.3. ТЕХНИКА И РЕЖИМЫ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Учет основных закономерностей формирования литого ядра и реакции металла на электротермомеханический цикл контактной сварки позволяет определить принципы построения режимов сварки основных групп конструкционных материалов.

Низкоуглеродистые стали (группа 1) с содержанием углерода до 0,25% имеют средние значения удельного электросопротивления $\rho = 0,13$ мкОм·м

и теплопроводности $\lambda = 60$ Вт/(м·К). Они хорошо свариваются как на жестких, так и мягких режимах при относительно небольших токах, электродами с плоской рабочей поверхностью. Низкоуглеродистая сталь отличается малой чувствительностью к термическому циклу сварки, узким интервалом температуры кристаллизации ($\approx 20^\circ\text{C}$) и поэтому может свариваться по циклограмме с постоянной силой сжатия, одним импульсом тока (рис. 11.4а). Ориентировочные режимы сварки приведены в таблице 11.1.

Таблица 11.1

Ориентировочные режимы точечной сварки низкоуглеродистых сталей типа 08 кп, 10, 20 на однофазных машинах переменного тока

s , мм	$I_{\text{св}}$, кА	$t_{\text{св}}$, с	$F_{\text{св}}$, кН	$F_{\text{к}}$, кН	$t_{\text{к}}$, с
0,5	6...7	0,08...0,10	1,2...1,8	Не рекомендуется	
0,8	7...8,5	0,10...0,14	2,0...2,5		
1,0	7,5...9	0,12...0,16	2,5...3		
1,2	9,5...10,5	0,12...0,20	3...4		
1,5	11...12	0,16...0,24	4...5		
2,0	12...13	0,20...0,32	6...7		
3,0	14...15	0,30...0,48	9...10	18...20	0,36...0,54
4,0	18...19	0,7...0,9	13...15	20...24	0,8...1,0

При точечной сварке *горячекатаной низкоуглеродистой стали* средней и большой толщины ($s > 4$ мм) целесообразно использовать режимы с пульсирующим включением тока (рис. 11.4г) и применением проковки. С поверхности горячекатаной стали следуют обязательно удалять окалину, используя механические или химические способы подготовки поверхности. *Компактные узлы* из горячекатаной стали толщиной от 4 до 10 мм сваривают на однофазных машинах переменного тока 6...10 импульсами продолжительностью 0,24...0,34 с каждый с паузами 0,08...0,12 с и ковочной силой $F_{\text{к}} = 1,5 \cdot F_{\text{св}}$. Пульсирующее включение тока позволяет снизить необходимые для сварки ток и силу сжатия, улучшить охлаждение электродов и уменьшить их износ.

Крупногабаритные конструкции из горячекатаной стали целесообразно сваривать импульсами тока низкой частоты или постоянного тока (рис. 11.6в, г, д) соответственно на машинах типа МТН и МТВ. Эти машины мало реагируют на введение в контур ферромагнитных масс, потребляют из сети меньшую мощность по сравнению с машинами переменного тока. Плавное нарастание тока в каждом импульсе уменьшает перегрев и износ электродов. На таком оборудовании можно получить необходимую при сварке стали большой толщины циклограмму с повышенной силой сжатия при сварке, предварительным сжатием и проковкой.

В промышленности широко используют *низкоуглеродистые стали с защитными покрытиями* различного типа (например, оцинкованную, освинцованную, а также сталь с фосфатными покрытиями). Основная трудность контактной сварки таких материалов заключается в активном взаимодействии металла покрытия и электродного металлов в контактах электрод — деталь,

что приводит к разрушению покрытия, снижению коррозионной стойкости соединения в местах постановки точек и повышению износа электродов. Для сварки таких материалов необходимо корректировать параметры режима по отношению к режимам точечной сварки непокрытых сталей (табл. 11.1), например, оцинкованную сталь сваривают импульсами тока большей величины по сравнению с режимами сварки металлов группы 1. Ориентировочно для стали с гальваническим покрытием средней толщины (20 мкм) $I_{св} = (1,5...1,8) \cdot I_{св1}$, $t_{св} = (1,8...2,0) \cdot t_{св1}$, $F_{св} = F_{св1}$. Здесь и в дальнейшем $I_{св1}$, $t_{св1}$, $F_{св1}$ — параметры режима сварки сталей группы 1. Для уменьшения налипания цинка на контактную поверхность электрода рекомендуется увеличивать время (до 0,3...0,4 с) и силу проковки, а зачистку и заправку электродов осуществлять после постановки 500...1000 точек.

Стали с тонкими фосфатными покрытиями (толщиной менее 7 мкм), полученными методами холодного и ускоренного горячего фосфатирования струйным обливом, свариваются контактной точечной сваркой по циклу с постоянной силой сжатия (рис. 11.4а) на режимах, соответствующих сварке непокрытых сталей группы 1. При этом используются электроды из хромистой бронзы со сферической формой рабочей поверхности радиусом 50...100 мм. Стали с фосфатными покрытиями толщиной более 10 мкм не свариваются без разрушения фосфатного слоя в местах постановки точек.

Среднеуглеродистые и низколегированные стали (группа 2) с содержанием углерода 0,25...0,45% и стали с суммарным содержанием легирующих элементов до 2,5% имеют относительно невысокое $\rho \approx 0,25$ мкОм·м и среднее значение теплопроводности $\lambda \approx 40$ Вт/(м·К). Повышенное содержание углерода и легирующих элементов обуславливает высокую прочность и твердость этих сталей в начальной стадии нагрева, склонность к образованию кристаллизационных трещин в ядре и закалке. Рекомендуется использовать для сварки металл в отожженном или нормализованном состоянии и режимы, обеспечивающие относительно медленный нагрев и охлаждение зоны соединения.

Точечная сварка этих сталей возможна по двум технологическим вариантам, уменьшающим хрупкость и вероятность появления трещин:

- на мягком режиме с использованием умеренных токов $I_{св} = (0,75...0,8) \cdot I_{св1}$, большой длительности $t_{св} = (4...5) \cdot t_{св1}$, повышенной силы сжатия $F_{св} = 1,5 \cdot F_{св1}$ и ограниченного времени проковки (рис. 11.4а);
- на двухимпульсном режиме по циклограмме (рис. 11.4е), когда после жесткого сварочного импульса следует дополнительный импульс тока $I_{доп}$ для электротермической обработки соединения непосредственно между электродами машины. Длительность паузы между сваркой и термообработкой, составляющая $t_{п} = (1,1...1,4) \cdot t_{св}$, должна быть достаточной для снижения температуры на периферии литого ядра до температуры конца мартенситного превращения. Последующий импульс тока $I_{доп} = (0,7...0,8) \cdot I_{св}$ длительностью $t_{доп} = (1,5...1,8) \cdot t_{св}$ осуществляет отпуск закаленной точки.

Режимы с электротермической обработкой между электродами машины обеспечивают высокую пластичность и прочность точечных соединений с отношением усилия отрыва к усилию среза сварных точек не менее 0,25.

Коррозионно-стойкие (нержавеющие) стали аустенитного класса (группа 3) типа 12Х18Н10Т обладают сравнительно высоким $\rho \approx 0,75 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ и низкой теплопроводностью $\lambda \approx 16 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Поэтому эти стали сваривают на токах существенно меньших, чем для сталей группы 1, а именно $I_{\text{св}} = 0,7I_{\text{св1}}$. Поскольку аустенитные стали часто используются в холоднокатаном состоянии, то для уменьшения степени разупрочнения металла в околошовной зоне ограничивают время сварки, ориентируясь на жесткие режимы сварки сталей группы 1 $t_{\text{св}} \approx t_{\text{св1}}$. Высокая жаропрочность металла и обусловленная ею склонность к выплескам требуют применения повышенных усилий сжатия $F_{\text{св}} = (1,5...2) \cdot F_{\text{св1}}$. Малая склонность аустенитных сталей к образованию горячих трещин позволяет применять простейший цикл сварки (рис. 11.4а) с постоянной силой сжатия. При толщине деталей более 2 мм желательно применение проковки (рис. 11.4б).

Жаропрочные сплавы (группа 4) на никелевой основе типа ХН75МБТЮ и ХН77ТЮР представляют собой дисперсионно твердеющие сплавы с интерметаллидным упрочнением. Эти сплавы в зависимости от состава имеют очень большое удельное электросопротивление $\rho \approx (0,9...1,5) \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, мало изменяющееся при нагреве, низкую теплопроводность $\lambda \approx 10...13 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ и повышенные прочностные свойства при высоких температурах. С учетом этих особенностей для сварки используют малый ток $I_{\text{св}} = (0,6...0,7) \cdot I_{\text{св1}}$ большой длительности $t_{\text{св}} = (2...4) \cdot t_{\text{св1}}$ и большие силы сжатия $F_{\text{св}} = (2,5...4,0) \cdot F_{\text{св1}}$. Обычно применяют циклограмму, представленную на рисунке 11.4а, но для предупреждения выплесков, дефектов усадочного характера и снижения остаточных напряжений, особенно для металла толщиной более 1,5 мм, целесообразно использовать циклограмму с предварительным обжатием и проковкой (рис. 11.4, в). Для устранения усадочных дефектов в центре ядра можно воспользоваться его переплавкой дополнительным импульсом тока $I_{\text{доп}} \approx 0,7I_{\text{св}}$. В особо сложных случаях при сварке металла небольшой толщины для борьбы с выплесками рекомендуется использовать предварительный подогрев или плавное нарастание сварочного тока.

Титановые сплавы (группа 5) в зависимости от структуры в нормализованном состоянии подразделяются на следующие основные классы: α -сплавы (ВТ1-1, ВТ5), $\alpha + \beta$ -сплавы (ВТ6С, ВТ14) и β -сплавы (сплав 4201). Кроме того, выделяются два переходных класса: псевдо β -сплавы (ОТ4, ВТ20) и псевдо α -сплавы (ВТ15). По своим механическим свойствам титановые сплавы подразделяют на малопрочные высокопластичные ($\sigma_{\text{в}} < 700 \text{ МПа}$), среднепрочные ($\sigma_{\text{в}} = 750...1000 \text{ МПа}$) и высокопрочные ($\sigma_{\text{в}} > 1000 \text{ МПа}$).

Сплавы титана имеют высокое удельное электросопротивление $\rho \approx 1,1...1,6 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ и низкую теплопроводность $\lambda \approx 8...10 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Основная проблема свариваемости титановых сплавов — получение сварных соединений с хорошей пластичностью, зависящей от качества защиты и чувствительности металла к термодформационному циклу сварки. Снижение пластичности титановых сплавов обусловлено активным взаимодействием титана с кислородом, азотом и водородом при температурах $\geq 350^\circ\text{C}$. Однако в связи с отсутствием прямого контакта металла ядра с воздухом и кратковременностью процесса при точечной (шовной) сварке не требуется специальной защиты. Из-за низкой

теплопроводности и малой объемной теплоемкости титана время пребывания металла при высоких температурах значительно больше, чем для стали, что может привести к перегреву, увеличению размеров зерна β -фазы в околошовной зоне и снижению пластичности. Поэтому целесообразно сварку титановых сплавов выполнять на минимально возможном токе при малой длительности его протекания.

Титановые сплавы малой прочности типа ВТ1 и ОТ4 сваривают на токах $I_{\text{св}} = (0,6 \dots 0,7) \cdot I_{\text{св1}}$. Время сварки $t_{\text{св}} \approx t_{\text{св1}}$ и сила сжатия $F_{\text{св}} \approx F_{\text{св1}}$ соответствуют жестким режимам сварки сталей группы 1. При сварке сплавов титана средней и высокой прочности типа ВТ5, ВТ14, ВТ15 и ВТ20, особенно при толщине деталей более 2 мм, рекомендуется повышать $F_{\text{св}}$ на 20...25%, а также использовать циклограмму с проковкой (рис. 11.4б) и модуляцию тока для борьбы с выплесками и возможной пористостью.

Алюминиевые и магниевые сплавы (группа 6) с точки зрения режимов сварки можно разделить на три подгруппы:

а) деформируемые алюминиевые сплавы, упрочняемые термообработкой (Д16АТ, Д20АТ, ВД95АТ и др.), а также малопластичный АМг6, упрочняемый нагартовкой;

б) пластичные деформируемые алюминиевые сплавы, упрочняемые нагартовкой (АМц, АМг, АМгЗ и др.);

в) деформируемые магниевые сплавы, упрочняемые нагартовкой (МА1, МА8, МА2, МА5 и др.) и жаропрочные сплавы, упрочняемые термообработкой (МА11, МА13 и др.).

Наибольшее влияние на величину параметров режима и циклограмму процесса сварки оказывают тепло- и электропроводность, предел текучести при повышенных температурах и реакция металла на термомеханический цикл сварки.

Легкие сплавы подгруппы «а» имеют малые значения $\rho \approx 0,06 \dots 0,13$ мкОм·м, высокий коэффициент теплопроводности $\lambda \approx 100 \dots 120$ Вт/(м·К), большое сопротивление деформации при повышенных температурах ($\sigma_{02} \approx 80$ МПа при $T = 300^\circ\text{C}$) и широкий температурный интервал кристаллизации (до 130°C). Указанные свойства обуславливают высокую склонность этих сплавов к выплескам, а в литом ядре велика вероятность образования дефектов типа раковин, пор и горячих трещин. Механические свойства металла ядра приближаются к свойствам отожженного сплава, а в околошовной зоне наблюдается снижение прочности и пластичности металла. Для предотвращения указанных дефектов рекомендуется повышать силу сжатия до $(1,2 \dots 1,4) F_{\text{св1}}$ и применять, начиная с толщины 0,5 мм, циклограмму (рис. 11.4б) с ковочной силой сжатия $F_{\text{к}} = (2 \dots 3) \cdot F_{\text{св1}}$.

Сварку легких сплавов этой подгруппы в связи с их малым удельным электросопротивлением и большой теплопроводностью целесообразно выполнять на жестких режимах $I_{\text{св}} = (3,5 \dots 4) \cdot I_{\text{св1}}$, $t_{\text{св}} = 0,5 \cdot t_{\text{св1}}$ на машинах постоянного тока и низкочастотных (реже конденсаторных). Этот тип контактных машин позволяет, по сравнению с машинами переменного тока, снизить потребляемую из сети мощность, что важно при больших токах, используемых для сварки цветных металлов. В таблице 11.2 приведены режимы сварки сплава Д16АТ, имеющего средние значения предела текучести и удельного электросопротивления для подгруппы «а».

Ориентировочные режимы точечной сварки легких сплавов подгруппы «а»

s, мм	Сила сжатия, кН		Время включения проковки, t_k , с	Импульс сварочного тока			
				основной		дополнительный	
	$F_{св}$	F_k		$I_{св. макс}$, кА	$t_{св}$, с	$I_{доп}$, кА	$t_{доп}$, с
Сварка на низкочастотных машинах							
0,5	2	5	0,04	26	0,04	—	—
0,8	3	6,5	0,06	32	0,04	—	—
1,0	4	9	0,08	40	0,06	—	—
1,5	5	14	0,1	47	0,08	—	—
2	7	19	0,14	56	0,1	—	—
2,5	9	26	0,16	65	0,12	—	—
3	12	32	0,22	70	0,16	—	—
4	18	60	0,28	85	0,2	—	—
Режимы сварки на машинах постоянного тока							
0,5	2	4,5	0,04	22	0,04	15	0,04
0,8	3	7	0,08	26	0,06	18	0,04
1,0	4	9	0,1	30	0,08	20	0,06
1,5	7	16	0,16	38	0,14	27	0,12
2,0	10	22	0,18	44	0,16	32	0,12
3,0	13	32	0,24	65	0,2	46	0,14
4,0	30	60	0,26	72	0,22	50	0,14

При сварке других сплавов этой подгруппы указанные режимы сварки следует корректировать. Так, например, при сварке сплава В95АТ с наиболее высоким пределом текучести $F_{св}$ должно быть увеличено на 15...20%, а ток на 5...10%. При сварке сплавов подгруппы «а» в не упрочненном состоянии (Д16АМ, Д20АМ и т. п.) рекомендуется понижать на 15–20% $F_{св}$ и F_k , по сравнению с упрочненными сплавами.

На однофазных машинах переменного тока из-за их ограниченной мощности сваривают детали из легких сплавов толщиной не более 2 мм. В этом случае при сварке легких сплавов подгруппы «а» применяют менее жесткие режимы сварки, в том числе с плавным нарастанием и спадом тока (рис.11.6б), а ковальную силу прикладывают, начиная с толщины деталей 1,5 мм.

Легкие сплавы подгруппы «б» имеют очень малое $\rho \approx 0,04...0,05$ мкОм·м, высокий $\lambda \approx 140...180$ Вт/(м·К), малое сопротивление деформации при повышенных температурах ($\sigma_{02} \approx 45$ МПа при $T = 300^\circ\text{C}$), узкий интервал кристаллизации и умеренную склонность к образованию горячих трещин. Поэтому для сплавов подгруппы «б» силу сжатия снижают на 30...40% по сравнению со сплавами подгруппы «а», а силу проковки $F_k = (1,5...2) \cdot F_{св}$ рекомендуется применять при сварке деталей толщиной более 1,5...2 мм. Сварку сплавов подгруппы «б» выполняют на жестких режимах ($t_{св} = 0,5 \cdot t_{св1}$) униполярными импульсами тока (рис.11.6г, д, е) большой силы $I_{св} = (3...3,5) \cdot I_{св1}$ на машинах постоянного тока, низкочастотных или конденсаторных.

Магниеые сплавы (легкие сплавы подгруппы «в») незначительно отличаются от алюминиевых сплавов по тепло- и электропроводности $\rho \approx 0,12 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, $\lambda = 100 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. У большинства сплавов этой подгруппы при нагреве наблюдается рост зерна и разупрочнение металла околошовной зоны, поэтому рекомендуется их сварку проводить с малой длительностью ($t_{\text{св}} \approx 0,07 \text{ с}$) по циклограмме (рис. 11.4б) с приложением силы проковки. Для точечной сварки магниевых сплавов применяют машины постоянного тока и низкочастотные. Реже, для деталей толщиной до 2 мм, используют однофазные машины переменного тока, при этом параметры нагрева ($I_{\text{св}}$ и $t_{\text{св}}$) смягчают, а силу сжатия увеличивают для борьбы с повышенными деформациями и короблением деталей.

Отличительной особенностью сварки алюминиевых и магниевых сплавов является активный массоперенос в контактах электрод — деталь, в результате которого происходит интенсивное загрязнение рабочей поверхности электродов частицами свариваемого металла и, наоборот, на поверхности точек оседают частицы металла электродов. Эти процессы снижают качество сварных соединений и нарушают стабильность процесса сварки. Поэтому необходимо зачищать поверхность электродов при сварке алюминиевых сплавов через 50...70 точек, а магниевых сплавов, после каждых 10...20 точек.

Медные сплавы (группа 7) имеют низкое $\rho \approx 0,06...0,10 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, как у алюминиевых сплавов, и высокое $\lambda \approx 80...110 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, поэтому их сваривают на жестких режимах униполярными импульсами (рис. 11.6г, д, е) используя большие токи $I_{\text{св}} = (2,5...3) \cdot I_{\text{св1}}$ и малое время сварки $t_{\text{св}} = (0,5...0,7) \cdot t_{\text{св1}}$, что обеспечивает уменьшение потерь тепла из зоны соединения в электроды и окружающий металл и формирование необходимых размеров расплавленного ядра, а также снижение деформации сварных узлов и повышение стойкости электродов. С другой стороны, высокая пластичность и малое сопротивление деформации при повышенной температуре позволяют сваривать медные сплавы по циклограмме (рис. 11.4а) с постоянной силой сжатия $F_{\text{св}} \approx F_{\text{св1}}$.

11.2.4. СВАРКА ДЕТАЛЕЙ РАЗНОЙ ТОЛЩИНЫ И РАЗНОИМЕННЫХ МЕТАЛЛОВ

В приборостроении часто встречаются соединения деталей разной толщины, например при изготовлении сильфонных блоков, мембранных узлов, где толщина тонкой детали составляет 0,02...0,3 мм, а толстой — 2...40 мм. В этом случае, при соотношении толщин свариваемых деталей 1 : 3 и более, наблюдается смещение литого ядра, относительно плоскости соединения в более толстую деталь (рис. 11.7). Это приводит к уменьшению проплавления тонкой детали (в крайнем случае оно может вообще отсутствовать) и уменьшению расчетного диаметра точки ($d_{\text{факт}}$), определяющего прочность соединения. Причиной такого положения является более интенсивный теплоотвод от плоскости соединения в электрод, расположенный со стороны тонкой детали по отношению к толстой.

Для устранения этого отрицательного явления возможны два пути: уменьшение теплоотвода в электрод со стороны тонкой детали и локализация выделения теплоты в плоскости соединения.

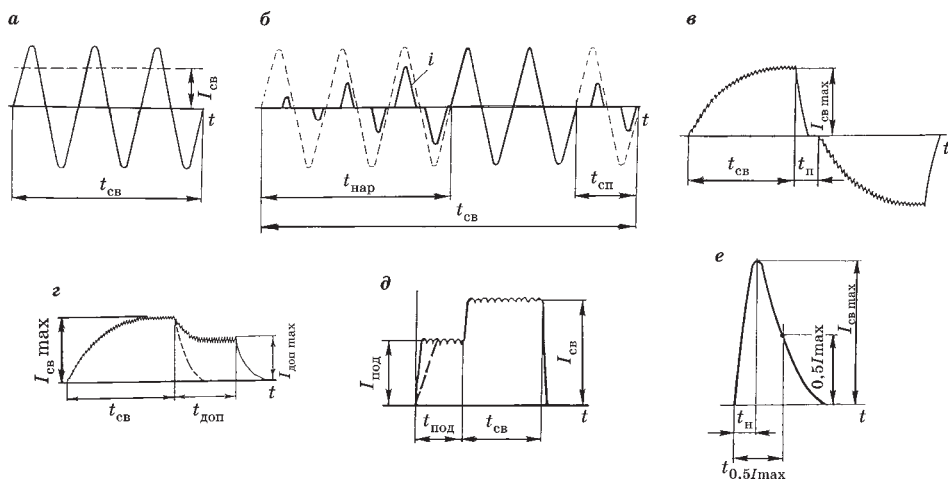


Рис. 11.7

Схема смещения литого ядра при сварке деталей разной толщины из одинакового металла электродами равных диаметров

Реализацию первого направления можно обеспечить за счет:

- уменьшения диаметра рабочей поверхности электрода и использования материала электрода с меньшей теплопроводностью со стороны тонкой детали (рис. 11.8а, б);
- применения теплового экрана-прокладки между поверхностью электрода и тонкой деталью из материала с меньшей тепло- и электропроводностью, чем свариваемый материал; выделяющаяся в прокладке теплота увеличивает нагрев тонкой детали и уменьшает сток тепла в электрод из зоны соединения (рис. 11.8в);
- использования термоэлектрического эффекта Пельтье, обеспечивающего при соответствующей полярности импульса сварочного тока, выделение теплоты в контакте разноименных материалов электрода и тонкой детали ($Q_{\text{п}} = \Pi \cdot I_{\text{св}} \cdot t_{\text{св}}$, где Π — коэффициент Пельтье, см. гл. 9).

Для реализации второго направления целесообразно использовать:

- более жесткие режимы сварки, позволяющие локализовать тепловыделение в плоскости соединения — в области наибольшего начального сопротивления;
- увеличение плотности тока в центральной зоне контакта свариваемых деталей за счет измененной конструкции рабочей части электрода (рис. 11.8г);
- уменьшение $F_{\text{св}}$, что приводит к повышению сопротивления контакта $r_{\text{д}}$ и, соответственно, увеличению выделения теплоты в плоскости соединения; в этом случае, для предотвращения выплесков, целесообразно использовать специальный электродный узел с обжимающей втулкой (рис. 11.8д);
- наличие рельефов (рис. 11.8е), выштампованных или закладных.

При сварке деталей из *разноименных металлов* одинаковой толщины, различие теплофизических характеристик свариваемых материалов ($T_{\text{пл}}$, ρ , λ , σ_{02}^T) приводит к смещению расплавленного ядра в деталь с большим удельным

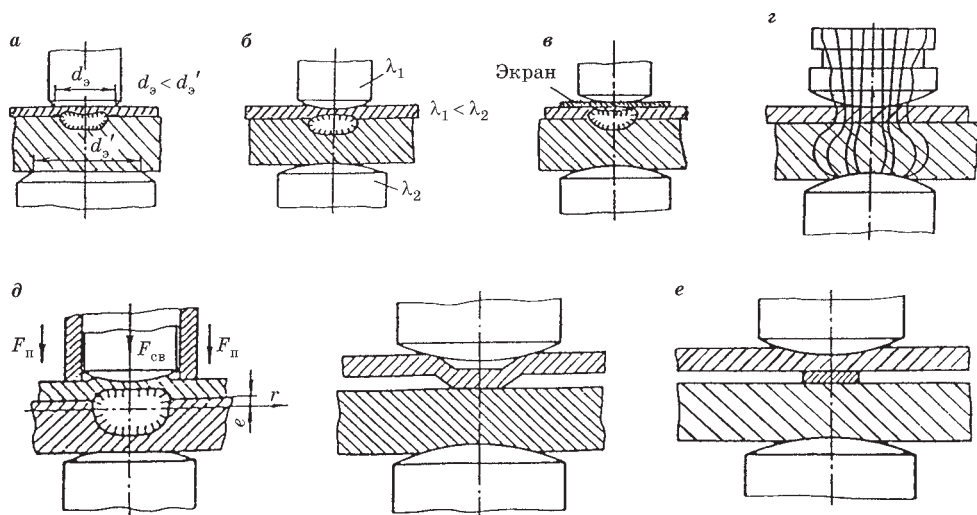


Рис. 11.8

Технологические способы уменьшения влияния разной толщины свариваемых деталей на смещение литого ядра:

a, б — изменение диаметра и материала электродов; *в* — использование теплового экрана (прокладки); *г* — изменение конструкции рабочей части электрода; *д* — уменьшение $F_{св}$ при использовании специального электродного узла с обжимной втулкой; *е* — использование рельефов.

сопротивлением и меньшей температурой плавления (рис. 11.9а). Причины и технологические приемы борьбы с этим явлением такие же, как и при рассмотренной сварке деталей из одноименных металлов разной толщины.

Проблемы сварки разноименных металлов часто усложняются еще и различной толщиной свариваемых деталей. Например, при сварке сталей 12Х18Н10Т толщиной 2,0 мм и 30ХГСА толщиной 0,8 мм, ядро полностью располагается в толстой детали, имеющей более низкую теплопроводность и температуру плавления (рис. 11.9б). Процесс формирования сварного соединения облегчается, если температура плавления и теплопроводность тонкой детали ниже, чем толстой (рис. 11.9в).

11.2.5. ПРОЧНОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ТОЧЕЧНОЙ (ШОВНОЙ) СВАРКОЙ

Прочность соединений, выполненных точечной (шовной) сваркой определяется размерами, формой ядра (литой зоны) и его расположением относительно плоскости контакта, а также присутствием концентрации напряжений по периметру ядра. Действие концентрации напряжений может быть уменьшено созданием пластичного металла в этой зоне или усилено, наличием послесварочной закалочной структуры. Причем наибольшее значение оказывает структура металла зоны термического влияния, а не структура металла ядра. Из размеров литой зоны наибольшее влияние на прочность точечных сварных соединений оказывает ее диаметр в плоскости соединения. Прочность шовных соединений на срез (разрыв) в меньшей степени зависит от ширины литой зоны, так как уже начиная с ширины литой зоны, равной 50...60% рекомендованной,

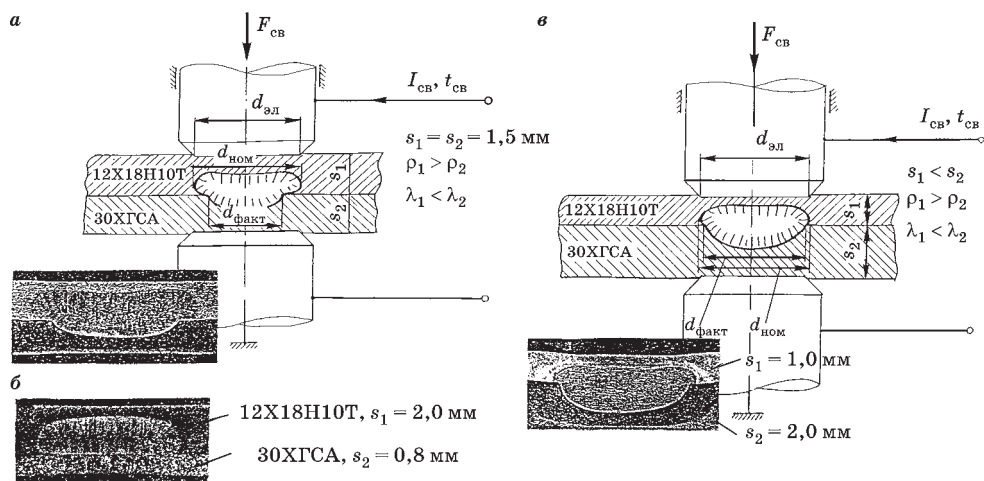


Рис. 11.9

Схемы и макрошлифы соединений разнотолщинных металлов одинаковой (а) и разной (б, в) толщины

соединения разрушаются с разрывом основного металла в зоне термического влияния. Величина проплавления деталей в пределах 20...80% мало влияет на прочность сварных соединений.

Режим сварки (жесткий или мягкий) при условии одинаковых размеров литой зоны для большинства рассматриваемых металлов существенно не влияет на прочность соединений. Исключение составляют металлы, чувствительные к термическому циклу сварки, а именно — стали, склонные к закалке (30XГСА и т. п.). Прочность сварных соединений этих сталей существенно зависит от режима сварки, то есть от длительности нагрева и последующей термической обработки в сварочной машине. Термическая обработка улучшает пластические свойства металла околошовной зоны и повышает прочность соединений на отрыв.

При переходе от одноточечных соединений к многоточечным расчетная прочность одной точки должна быть уменьшена на 10...15% из-за неравномерного распределения нагрузки между точками.

В большинстве случаев показатели прочности сварных швов определяют, используя простые в изготовлении и испытании образцы при их разрушении (рис. 11.10). Они не могут полностью соответствовать условиям работы соединений в реальных конструкциях. Однако при однотипности формы образцов и равенстве диаметра точек, полученные данные их испытаний используются в расчетах для сопоставления работоспособности различных типов соединений, выбора вариантов технологии и оборудования, а также при контроле качества сварки. В зависимости от условий эксплуатации и ответственности конструкций образцы подвергают испытанию при воздействии статических и динамических нагрузок на срез, отрыв, кручение, удар и усталость при нормальной, повышенной и пониженной температурах.

На *статический срез* испытывают образцы растяжением в разрывной машине. В таблице 11.3 по результатам испытаний приведены разрушающие

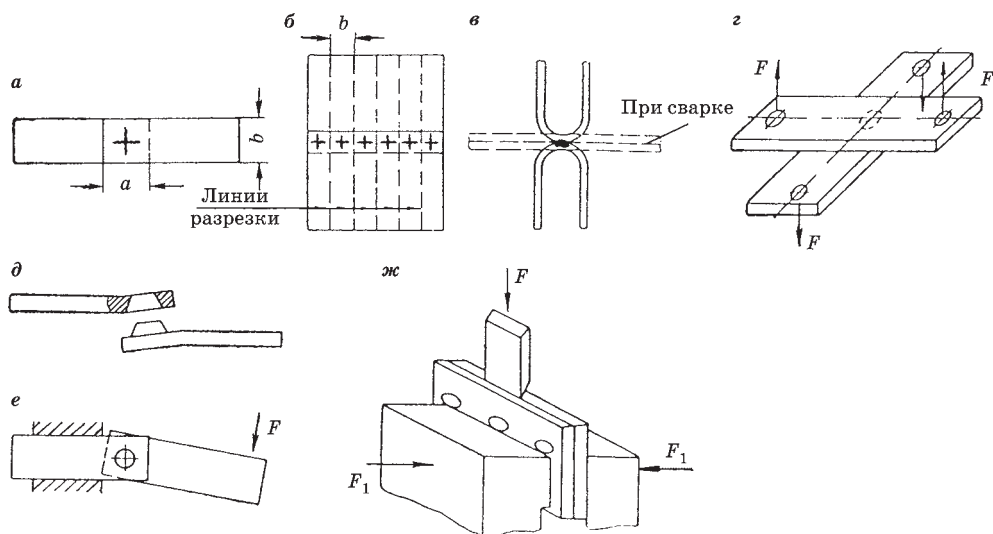


Рис. 11.10
Образцы для механических испытаний сварных соединений,
выполненных точечной контактной сваркой

силы на срез на одну точку для различных металлов при номинальном значении размеров литой зоны шва.

Обычно при отношении $d/s \geq 3$ разрушается основной металл с вырывом точек и изгибом нахлестки (рис. 11.10д). При $d/s < 3$ разрушение распространяется по ядру и завершается срезом точки при незначительном изгибе нахлестки. Герметичные швы разрушаются по зоне термического влияния с большим изгибом образцов.

Таблица 11.3

Средняя разрушающая сила на одну точку при статическом срезе, даН

Свариваемые материалы	Толщина тонкой детали, мм						
	0,3	0,5	0,8	1,0	1,5	2,0	3,0
Сталь 08 кп	120	200	400	580	1170	1630	2550
30ХГСА, отожженная	150	280	540	730	1480	2210	2950
12Х18Н10Т	140	240	480	700	1380	1930	2150
0Т4, ВТ5	160	280	550	770	1580	2300	3450
Д16АТ, АМг6	45	90	180	270	460	700	1200
МА2-1	30	70	120	160	320	420	770

Для испытания на отрыв в большинстве случаев применяют крестообразные образцы (рис. 11.10в, г), которые закрепляют в специальном приспособлении. Прочность оценивают по разрушающей силе отрыва $F_{отр}$. Для большинства конструкционных сталей и сплавов $F_{отр}$ находится в интервале $(0,25...0,5) F_{ср}$. Отношение $F_{отр}/F_{ср}$ используют в качестве приближенной

оценки пластичности соединения, причем большее значение относится к более пластичным соединениям.

Соединения, выполненные точечной сваркой, имеют низкую усталостную прочность. Эффективным методом ее повышения является применение цикла сварки с ковочной силой $F_k = (2,5 \dots 3) \cdot F_{св}$, которая одновременно снижает и остаточные деформации сварных узлов.

Усталостная прочность соединений оценивается циклическими испытаниями: малоцикловыми нагружениями с частотой не более 50 и многоцикловыми с частотой 2000...2500 циклов в минуту. Предел выносливости при многоцикловых нагружениях рабочих точек составляет 15...25% предела выносливости основного материала; для связующих точек — 50...70%; для рабочих соединений, выполненных шовой сваркой, — 20...30%.

11.3. ОСОБЕННОСТИ ШОВНОЙ СВАРКИ; ЦИКЛОГРАММЫ И ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА

Шовная сварка широко используется для получения герметичных соединений деталей толщиной 0,2...4 мм, собранных внахлестку. Например, при сварке продольных и кольцевых швов обечаек, при изготовлении бензобаков, сильфонных и мембранных узлов и т. п.

Процесс шовой сварки, включая подготовку поверхности деталей, сборку, прихватку, сварку и послесварочные операции, аналогичен точечной сварке. Герметичность соединения обеспечивается за счет последовательной постановки ряда точек, перекрывающих друг друга на 25...40%. В отличие от точечной, шовная сварка (рис. 11.11) выполняется между вращающимися дисковыми электродами, передающими сварочный ток и силу сжатия, что приводит к ряду особенностей процесса:

- повышенному сопротивлению контактов между электродами и деталями ($r_{эд}$);
- шунтированию сварочного тока через ранее сваренные точки;
- отсутствию проковки каждой точки.

Повышенное сопротивление $r_{эд}$, вызванное наличием перемещающегося контакта электрод — деталь, и непрерывное включение сварочного тока (циклограмма на рисунке 11.12а), приводят к значительному тепловложению в зоне соединения, увеличению зоны термического влияния, окислению металла деталей перед электродами, нагреву и быстрому износу рабочей поверхности электродов (роликов). Поэтому такая схема процесса используется только для единичного производства малоответственных узлов. Возможно ее использование для шовой сварки тонкостенного металла (0,15...0,35 мм) на повышенной скорости с раздавливанием кромок.

Основным способом шовой сварки является *прерывистая сварка*, когда кратковременные импульсы тока чередуются с паузами при непрерывном движении деталей (рис. 11.12б). Во время паузы теплота, выделившаяся в контакте электрод — деталь, интенсивно отводится в охлаждаемые электроды, что уменьшает износ их рабочей поверхности, а также уменьшает окисление

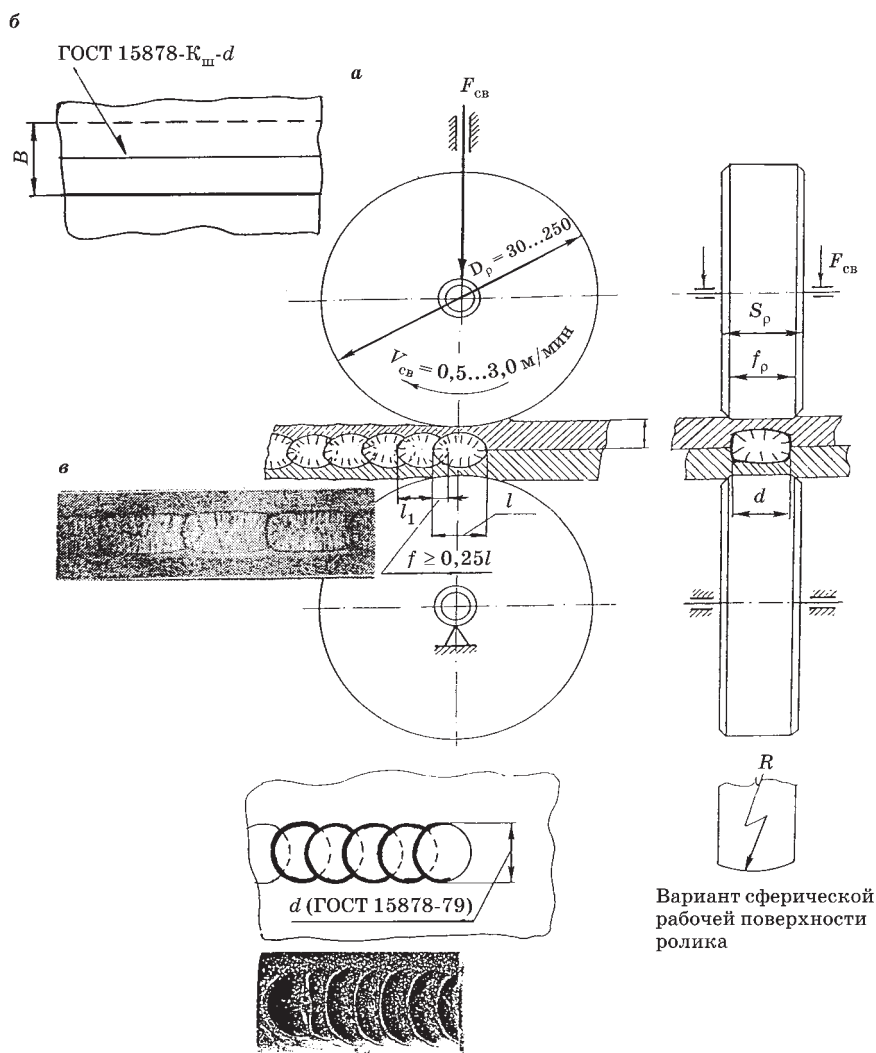


Рис. 11.11

Схема шовной сварки с конструктивными размерами соединения (а), обозначение его на чертежах (б) и макрошлиф продольного сечения шва (в)

поверхности деталей и протяженность зоны термического влияния. Электроды во время паузы, прокатываясь по нагретой поверхности детали, вызывают пластическую деформацию ее выступов, частичное разрушение окисных пленок и уменьшение контактного сопротивления электрод — деталь. Это способствует уменьшению тока через зону шунтирования и увеличению полезного тока, что облегчает достижение высокого качества соединения. Длительность каждого импульса тока подбирается таким образом, чтобы за время его действия образовалась литая зона определенных размеров (по ГОСТ 15878-79). Учитывая более высокое теплосодержание в зоне соединения при шовной

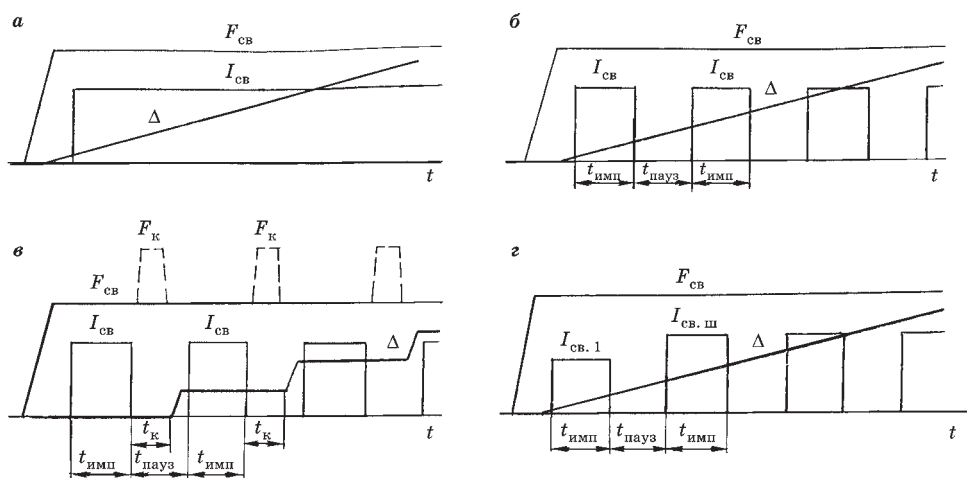


Рис. 11.12

Типовые циклограммы шовой сварки:

а — с непрерывным включением тока и вращением электродов; *б* — с прерывистым включением тока и непрерывным вращением электродов; *в* — с прерывистым включением тока и шаговым вращением электродов; *г* — с уменьшенной величиной сварочного тока первого импульса.

сварке по отношению к одноточечной $t_{\text{имп.ш}} = (0,78 \dots 0,80) \cdot t_{\text{св.т}}$, где $t_{\text{имп.ш}}$ и $t_{\text{св.т}}$ — время импульса сварочного тока при шовой и точечной сварке, обеспечивающее одинаковый объем расплавленного металла. Длительность паузы ($t_{\text{п}}$, с) и скорость сварки ($V_{\text{св}}$, м/мин) должны обеспечивать перекрытие точек на 25...40%:

$$V_{\text{св}} = \frac{0,06l_1}{t_{\text{имп}} + t_{\text{п}}},$$

где $l_1 = (0,4 \dots 0,5) \cdot d$ — шаг точек герметичного шва, мм; $t_{\text{п}} = (1,1 \dots 1,2) \cdot t_{\text{имп}}$ при сварке низкоуглеродистых сталей, 1,5...2 — при сварке алюминиевых сплавов и 0,5...0,8 — при сварке закаливающихся сталей.

Скорость сварки уменьшается с ростом толщины деталей, что связано с замедлением скорости нагрева и кристаллизации, и несколько увеличивается при сварке металла с большой теплопроводностью. Сила сжатия при шовой сварке на 10...30% выше, чем при точечной.

Второй особенностью шовой сварки является шунтирование тока через ранее сваренный участок шва. Для компенсации этого явления сила сварочного тока при шовой сварке ($I_{\text{св.ш}}$) по сравнению с точечной ($I_{\text{св.т}}$) увеличивается на 20...40%. Однако при сварке первой точки шва условия формирования соединения такие же, как и при точечной сварке. Поэтому для предупреждения перегрева и выплеска металла при сварке первой точки сварочный ток уменьшается на 10...15% по сравнению с током для сварки всего шва (рис.11.12г).

Влияние теплофизических свойств свариваемых металлов на выбор параметров режима при шовой сварке такое же, как и при точечной. Шовную сварку низкоуглеродистой стали выполняют на жестких режимах (табл. 11.4),

а коррозионно-стойкие стали сваривают на жестких режимах с использованием повышенных $F_{св}$. Титановые сплавы сваривают практически на тех же токах, что и коррозионно-стойкие стали, но при $F_{св}$, соответствующих низкоуглеродистым сталям.

Таблица 11.4

Ориентировочные режимы шовой сварки низкоуглеродистых сталей 08 кп, 10, 20 на однофазных машинах переменного тока *

Толщина деталей, мм	$I_{св}$, кА	$t_{нап}$, с	$t_{п}$, с	$F_{св}$, кН	$V_{св}$, м/мин
0,5	7...8	0,02...0,04	0,04...0,06	1,5...2,0	1,2...1,4
0,8	8,5...10,0	0,04...0,06	0,04...0,08	2...3	1,0...1,2
1	10,5...12,0	0,06...0,08	0,08...0,10	3...4	0,8...0,9
1,2	12...13	0,08...0,10	0,10...0,12	4...5	0,7...0,8
1,5	13,0...14,5	0,12...0,14	0,12...0,14	5...6	0,6...0,7
2	15,5...17,0	0,16...0,18	0,18...0,22	7...8	0,5...0,6
3	18...20	0,24...0,32	0,28...0,34	10...11	0,4...0,5

*Форма рабочей поверхности роликов — цилиндрическая, циклограмма процесса — рис. 11.12б.

Третья особенность и недостаток шовой сварки заключается в отсутствии проковки каждой точки, что при сварке сталей больших толщин и особенно алюминевых сплавов толщиной более 2 мм приводит к появлению недопустимых усадочных дефектов. В этом случае необходимо использовать *шовно-шаговую сварку*. Шаговая сварка выполняется при прерывистом включении тока и прерывистом (шаговом) вращении роликов (рис. 11.12в). При этом способе ток включается во время остановки роликов. Кристаллизация расплавленного металла происходит под давлением электродов и появляется возможность прикладывать повышенные силы проковки. Такой цикл сварки применяют, в первую очередь, для алюминиевых и магниевых сплавов, имеющих широкий интервал температуры кристаллизации и склонных к возникновению трещин в литом ядре.

11.4. РЕЛЬЕФНАЯ КОНТАКТНАЯ СВАРКА

При рельефной сварке, в отличие от точечной, место, форма и площадь контакта между деталями определяется не положением и размерами рабочей части электродов, а геометрической формой самих соединяемых поверхностей, в том числе — размерами, формой и расположением рельефов. Рельефы при соотношении толщин свариваемых деталей до 1 : 3 выполняются на более толстой детали, а при сварке разноименных металлов на детали с более высокой электро- и теплопроводностью.

Электротермодеформационные процессы при рельефной сварке сходны с процессами при точечной и стыковой сварке. В начальный период, в результате радиально направленной интенсивной пластической деформации рельефа в области сварочного контакта (которая в 10...15 раз больше, чем при точечной) идут процессы очистки поверхности и схватывания с образованием

металлических связей в твердом состоянии. Во второй половине цикла сварки образуется зона взаимного расплавления деталей. Наличие литой зоны стабилизирует прочность соединения, особенно при сварке коррозионно-стойких и жаропрочных сплавов, а также облегчает последующий контроль.

Рельефная сварка обладает рядом *достоинств*, главными из которых являются:

- высокая производительность: число одновременно свариваемых точек одним импульсом тока достигает 10 и более;
- компактность сварных узлов: шаг между точками при рельефной сварке может быть меньше, чем при точечной, а сами рельефы могут располагаться ближе к кромке деталей;
- возможность формирования рельефов кольцевой формы или по любому заданному контуру;
- снижение требований к состоянию поверхности деталей: при штамповке рельефа оксидная пленка частично разрушается, чему также способствует высокое удельное давление, развиваемое на стадии сжатия при сварке;
- возможность сварки деталей резко различной толщины и сечения, а также материалов с различными теплофизическими свойствами, в том числе без расплавления зоны соединения, что позволяет исключить появление интерметаллидных фаз;
- возможность легирования металла литого ядра при осуществлении рельефной сварки через вставки;
- повышенная стойкость электродов по отношению к точечной сварке;
- более простая конструкция машины для рельефной сварки по сравнению с многоэлектродными точечными машинами.

В то же время рельефной сварке присущи и некоторые *недостатки*, которые необходимо учитывать при разработке технологии сварки, элементов сварочного оборудования и при оценке технико-экономической целесообразности ее применения. К таким недостаткам следует отнести:

- более высокую вероятность возникновения выплесков металла в начальный период протекания сварочного тока из-за резкого снижения силы сжатия в зоне соединения, связанного со значительной величиной осадки рельефа и инерцией подвижного электродного узла машины;
- усложнение конструкции электродных узлов и их эксплуатации при много-рельефной сварке;
- необходимость образования рельефов штамповкой или точением, что связано с дополнительными затратами, окупаемыми лишь в условиях массового производства.

Рельефную сварку применяют для соединения деталей из сталей и титановых сплавов, реже — из цветных металлов. Очень широко рельефную сварку применяют в приборостроении для соединения деталей малых толщин и сечений из разноименных металлов и сплавов, в том числе с покрытиями.

В зависимости от конструкции и взаимного расположения свариваемых деталей различают 3 группы рельефных соединений (рис. 11.13): нахлесточные, тавровые, в том числе с острой гранью, и крестообразные.

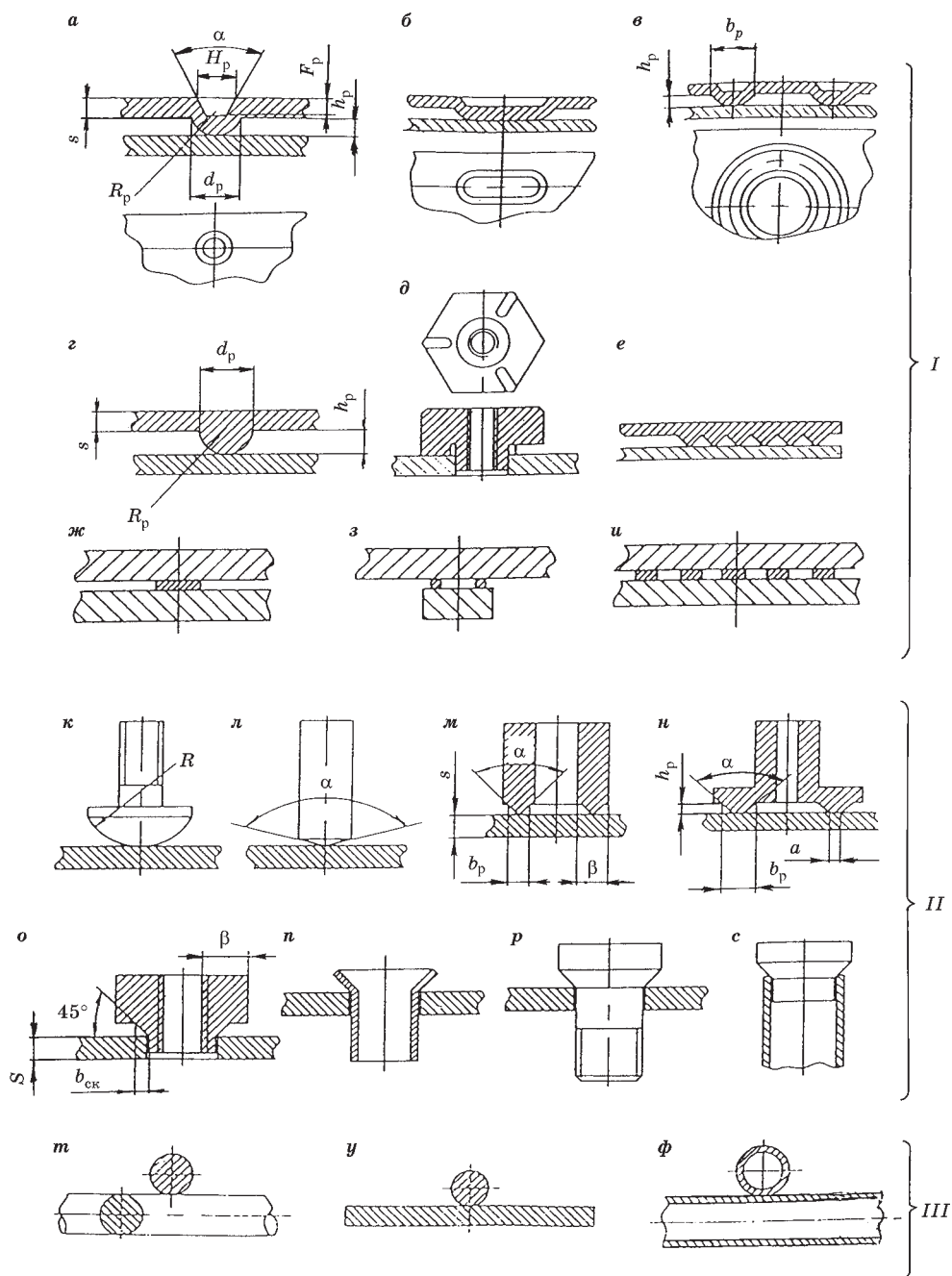


Рис. 11.13

Основные типы соединений при рельефной сварке:

I — нахлесточные: *a*, *б*, *в* — со штампованными рельефами; *г*, *д*, *е* — с высеченными рельефами; *ж*, *з*, *и* — с рельефами в виде вставок; *II* — тавровые соединения: *к*, *л*, *м*, *н* — торцовые, *о*, *п*, *р*, *с* — с острой гранью; *III* — крестообразные соединения.

Нахлесточные рельефные соединения. Наиболее широко применяют сварку листов внахлестку со *штампованными рельефами* (рис. 11.13а, б, в). Для сварки листов из сталей и титановых сплавов используют круглый одиночный рельеф сферической формы. Ориентировочно диаметр и высоту рельефа в зависимости от толщины детали s можно определить из соотношений:

$$d_p = (1,8...2) \cdot s + 1 \text{ мм}; \quad h_p = (0,37...0,4) \cdot s + 0,3 \text{ мм};$$

$$d_p = (0,6...0,8) \cdot d; \quad h_p = (0,2...0,3) \cdot d_p.$$

При выборе значений параметров режима и закона их изменения в процессе сварки следует исходить из необходимости создания условий для нагрева зоны сварочного контакта до температуры, близкой к температуре плавления и обеспечения интенсивной пластической деформации металла рельефа (без его перегрева и выплеска или преждевременного смятия) с последующим, после осадки рельефа, образованием литого ядра. Для выполнения этих условий при сварке деталей толщиной 0,5...3,0 мм рекомендуется использовать циклограмму процесса с постоянной повышенной силой сжатия (рис. 11.4а). Для сварки больших толщин (3,5...6 мм) применяют циклограмму с предварительным нагревом и повышенной силой проковки, что позволяет уменьшить зазоры между деталями и устранить дефекты усадочного характера. Для борьбы с выплесками рельефную сварку осуществляют модулированным импульсом тока (рис. 11.6б) с длительностью нарастания $t_{\text{нар}} = (0,2...0,3) \cdot t_{\text{св}}$ и начальным значением тока $I_{\text{св.н}} = (0,3...0,5) \cdot I_{\text{св}}$.

При сварке закаливающих сталей (типа 30ХГСА) целесообразно использовать циклограмму, представленную на рисунке 11.4е, обеспечивающую термообработку соединения в электродах машины. Применение F_k предупреждает дефекты усадочного характера, а также увеличивает прочность рельефных соединений, особенно при сварке без расплавления.

В таблице 11.5 приведены режимы рельефной сварки низкоуглеродистой стали, обеспечивающие образование соединений группы А на машинах переменного тока промышленной частоты с модулированным сварочным импульсом.

Таблица 11.5

Режимы рельефной сварки низкоуглеродистой стали

s , мм	d , мм	$F_{\text{св}}$, кН	$I_{\text{св}}$, кА	$t_{\text{св}}$, с	$t_{\text{нар}}$, с
0,5	3	0,6...0,9	4,5...5,5	0,06...0,10	0,02...0,04
0,8	4	0,9...1,3	6...7	0,08...0,12	0,04...0,06
1	5	1,2...1,6	7...8	0,12...0,20	0,04...0,08
1,5	6	2...3	9,5...11,0	0,2...0,3	0,06...0,10
2	7	2,8...4,0	11,0...12,5	0,3...0,4	0,10...0,16
2,5	8	4...5	13...15	0,4...0,6	0,14...0,24
3	9	5...7	15...17	0,6...0,8	0,2...0,3

При малой ширине нахлестки применяют *рельефы удлиненной формы* (рис. 11.13б), позволяющие получить необходимую площадь, а следовательно, и прочность соединения. Для сварки металла толщиной 0,4...0,6 мм целесообразно применять *кольцевые рельефы* (рис. 11.13в), которые обладают повышенной жесткостью и меньше сминаются под действием силы сжатия до включения тока. Равнопрочность сварного соединения основному металлу достигается при следующих размерах поперечного сечения кольцевых рельефов: ширина основания $b_p = (1,2...1,5) \cdot s$; высота $h_p = (0,6...0,8) \cdot s$.

Параметры режима сварки рекомендуется определять из соотношений:

$$F_{\text{св}} = (12...15) \cdot sl \quad I_{\text{св}} = (0,6...0,8) \cdot l \quad t_{\text{св}} = (0,06...0,1) \cdot s^2$$

где s — толщина детали в мм; l — длина периметра рельефа, мм; $F_{\text{св}}$, даН; $I_{\text{св}}$, кА; $t_{\text{св}}$, с.

При сварке алюминиевых и других сплавов с малой жаропрочностью рекомендуется использовать *сплошные рельефы*, создаваемые высадкой в процессе формообразования детали (рис. 11.13г). Такие рельефы обладают повышенной жесткостью в процессе нагревания и позволяют получать сварные соединения с формированием литого ядра.

При рельефной сварке деталей неравной толщины (например, специальных гаек с листом) компактные рельефы разнообразной формы и высоты получают холодной высадкой, располагая их у края гайки для облегчения закрытия зазора между деталями (рис. 11.13д). Для миниатюрных деталей из разноименных металлов малой толщины (менее 0,3...0,4 мм) целесообразно изготавливать рельефы в виде пирамид треугольного или трапециoidalного сечения (рис. 11.13е), располагая их на детали с более высокой тепло- и электропроводностью.

Рельефную сварку пластин толщиной 4 мм и более, когда штамповка рельефов затруднительна, возможно осуществлять с *применением вставок* (рис. 11.13ж, з, и) круглой или продолговатой формы диаметром $(0,5...0,6) \cdot s$ и толщиной $(0,12...0,15) \cdot s$, а также в виде колец из проволоки. При необходимости вставка может быть из другого по составу металла, что позволяет улучшить свариваемость и легировать металл литого ядра.

Как правило, при рельефной сварке нахлесточных соединений используют электродные плиты или электроды с плоской рабочей поверхностью. Для обеспечения равномерного распределения тока и силы сжатия между рельефами при рельефной многоточечной сварке рабочие поверхности электродных плит должны быть строго параллельными и не смещаться относительно друг друга в процессе сварки. Допускается непараллельность плит не более 0,25 мм на базе 200 мм.

Тавровые рельефные соединения. Различают два вида тавровых соединений: торцевые и соединения с острой гранью. У торцевых соединений (типа шпилек и болтов с листом) рельеф имеет сферическую или коническую форму ($\alpha = 120...170^\circ$), обеспечивающую локальный нагрев деталей и протекание интенсивной пластической деформации металла в плоскости соединения (рис. 11.13к, л). При выполнении этих условий формируется твердофазное сварное соединение высокой прочности, которое при испытании разрушается с вырывом по основному металлу.

Сварочный ток к длинным стержням или шпилькам подводится через их боковую поверхность вблизи от места сварки с использованием цанговых или призматических токоподводов (электродов, см. рис. 13.6), исключающих проскальзывание деталей под действием силы осадки. При сварке коротких стержней типа шипов или бобышек возможен подвод тока с торца деталей, если нет опасности их перегрева и деформации. К деталям, имеющим головки с заплечиками, ток подводят с использованием полых электродов, опирающихся на эти заплечики.

Поскольку для сварки тавровых соединений стержней характерно большое разнообразие конструктивных форм подготовки деталей, схем токоподвода и приложения силы сжатия, режимы сварки определяют опытным путем. При этом можно использовать следующие рекомендации для сварки стальных стержней диаметром 4...12 мм: $I_{\text{св}} = (1,2...1,6) \cdot d_{\text{ст}}, \text{ кА}; t_{\text{св}} = 0,1...0,3 \text{ с}.$

Сварка тавровых соединений деталей типа втулок, заглушек, бонков (рис. 11.13м) с использованием кольцевых рельефов треугольной формы с углом $\alpha = 90^\circ$ на их торцевой поверхности, позволяет получать прочно-плотные сварные соединения в твердой фазе без перегрева и деформации деталей вне зоны сварки.

При выборе режимов сварки таких деталей можно воспользоваться рекомендациями для нахлесточных соединений с кольцевыми рельефами.

При сварке тавровых соединений тонкостенных втулок ($\beta < 3s$), а также для получения сварных соединений с кольцевой расплавленной зоной, втулки изготавливают с фланцами (рис. 11.13н) шириной не менее 2,5s и толщиной 1...2 мм, на торце которых имеется рельеф. Рекомендуемая форма рельефов — трапецеидальная ($\alpha = 120^\circ$) или закругленная с $h_p = 0,5...0,8 \text{ мм}, b_p = 1,5...2 \text{ мм}.$

При сварке *тавровых соединений острой гранью* (рис. 11.13о, п, р, с) создаются благоприятные условия для интенсивной пластической деформации металла на свариваемых поверхностях обеих деталей. Это способствует повышению качества сварки, равномерному провару по периметру соединения. Рекомендуемый угол скоса при сварке острой гранью $\alpha = 45^\circ$, ширина скоса $b_{\text{ск}} \leq (0,4...0,5) \cdot \beta$. По сравнению со сваркой торцевых соединений в этом случае требуются меньшие величины $I_{\text{св}}$ и $t_{\text{св}}$.

Крестообразные рельефные соединения. Сварка крестообразных соединений (рис. 11.13т, у, ф) широко используется в производстве сеток, решеток, каркасов железобетонных конструкций и других изделий. Сварка стержней между собой или стержня с листом сопровождается значительной пластической деформацией деталей в процессе их осадки. При этом расплавленный металл выдавливается из стыка и соединение формируется в твердой фазе. Равнопрочность соединения обеспечивается при величине осадки стержня из низкоуглеродистой стали на 25% его диаметра. При сварке стержней с повышенным содержанием углерода осадку увеличивают до 40% из-за разупрочнения металла в зоне нагрева. Ориентировочно режимы сварки стержней диаметром 2...12 мм из низкоуглеродистой стали с учетом величины осадки Δ выбирают: для $\Delta = 15\%$ — $I_{\text{св}} = (800...1000) \cdot d_{\text{ст}}, \text{ А}; F_{\text{св}} = (60...100) \cdot d_{\text{ст}}, \text{ даН};$ для $\Delta = 30\%$ — $I_{\text{св}} = (1000...1300) \cdot d_{\text{ст}}, \text{ А}; F_{\text{св}} = (80...200) \cdot d_{\text{ст}}, \text{ даН};$ для $\Delta = 15$ и 30% $t_{\text{св}} = (0,06...0,1) \cdot d_{\text{с}}, \text{ с}.$

11.5. ДЕФЕКТЫ ТОЧЕЧНОЙ, ШОВНОЙ И РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ, ПРИЧИНЫ ИХ ПОЯВЛЕНИЯ И МЕТОДЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ

В результате нарушения технологического процесса изготовления сварных изделий на любом его этапе возможно образование дефектов, которые можно разделить на дефекты сварных узлов и дефекты сварных соединений.

К дефектам сварных узлов относятся нарушения их геометрических размеров и формы, заданных чертежом. Причинами этих дефектов могут быть сварочные деформации элементов узла, возникающие вследствие термомеханического воздействия на металл в процессе сварки; технологические деформации, связанные с работой оборудования, приспособлений и положением узла при сварке; несоблюдение геометрических размеров при сборке и прихватке деталей узла. Для предупреждения деформаций необходимо предусматривать: а) конструктивные мероприятия, обеспечивающие одинаковую жесткость детали, жесткость приспособления, ограничение взаимного смещения электродов при точечной сварке и равенство диаметров роликов при шовной сварке; б) тщательную сборку деталей с минимальными и равномерно распределенными зазорами; в) рациональное расположение прихваток, определенную последовательность и направление сварки; г) жесткие режимы сварки с повышенной сварочной и ковочной силой.

Дефекты сварных соединений подразделяются на три основные группы:

- непровары — полное отсутствие взаимного литого ядра соединяемых деталей или уменьшение его величины по сравнению с требуемой $d_{\text{мин}}$ по ГОСТ 15878-79;
- наружные и внутренние выплески;
- нарушение сплошности литой зоны — трещины, раковины, поры.

Непровары проявляются в нескольких формах. Наиболее опасен непровар в виде склейки (рис.11.14б). В этом случае расплавленное ядро отсутствует и соединение деталей происходит в твердом состоянии в небольших зонах схватывания (островках металлических связей), где в области отдельных микровыступов были обеспечены благоприятные условия развития пластической деформации. Такое соединение по внешнему виду часто не отличается от качественно сваренной точки. Оно выдерживает относительно большие статические срезающие силы, но быстро разрушается при действии отрывающих и знакопеременных нагрузок.

К другим видам непровара следует отнести уменьшение размеров ядра менее установленных номинальных значений (рис. 11.14в), а также своеобразный вид непровара, связанный с уменьшением (рис. 11.14г) или полным отсутствием (рис.11.14д) общего ядра. Обычно этот дефект наблюдается при наличии на поверхности деталей из жаропрочных сплавов толстых тугоплавких оксидных пленок, которые не разрушаются электромагнитными силами при перемешивании расплавленного металла ядра. Аналогичный дефект возможен при наличии значительного слоя плакировки из чистого алюминия на поверхности деталей из сплавов типа АМг6, Д16 и др., обладающих более низкой температурой плавления, чем слой плакировки.

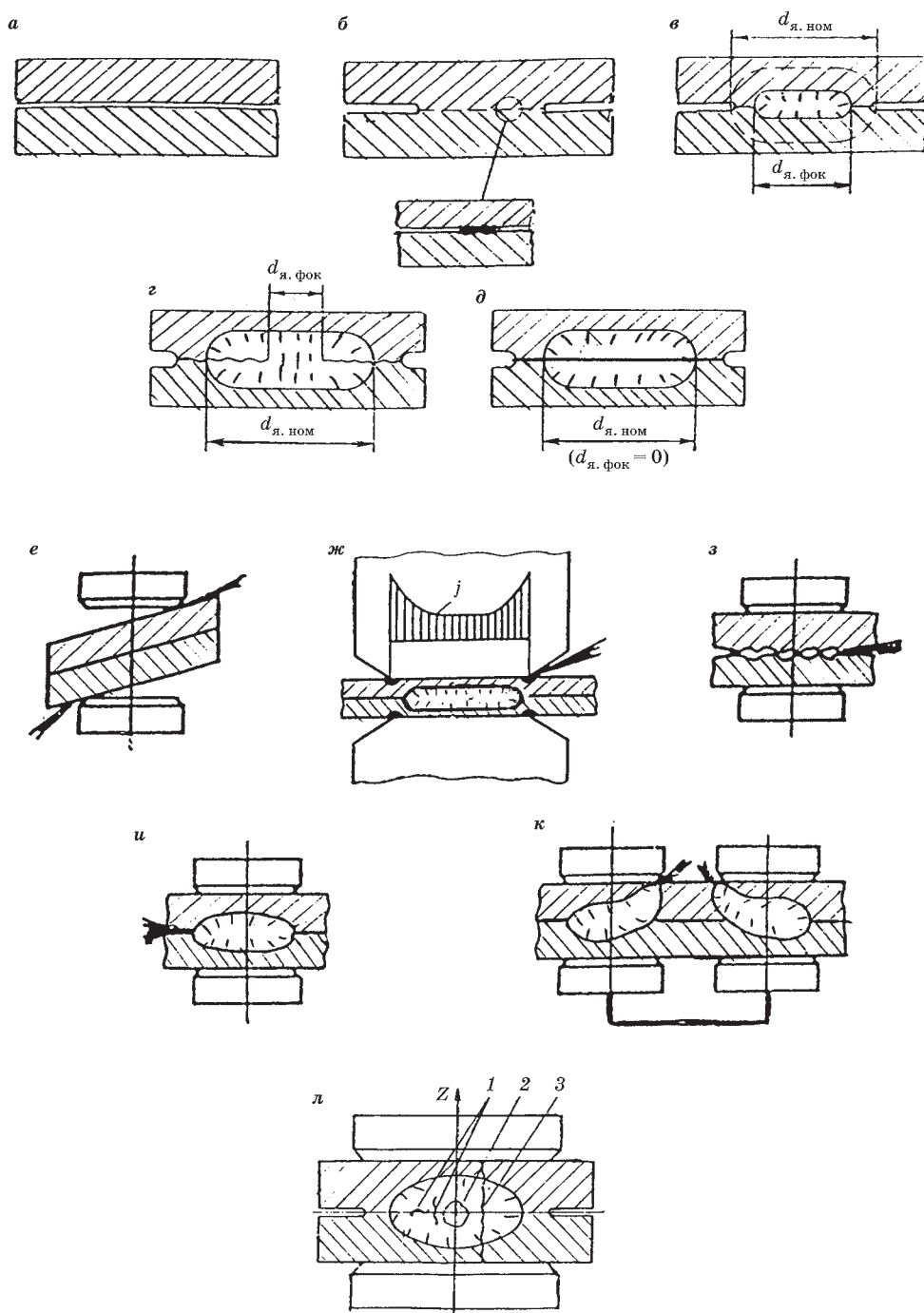


Рис. 11.14
 Виды дефектов при точечной сварке:
 1 — непровары; 2 — выплески; 3 — трещины, раковины.

Непровары, связанные с уменьшением фактического диаметра ядра, могут возникать при сварке разноименных металлов и деталей не равной толщины в связи со смещением литого ядра относительно плоскости соединения (см. 11.2.4, рис. 11.7, 11.9).

Основными причинами непроваров являются:

- изменение параметров режима сварки (снижение $I_{\text{св}}$ и $t_{\text{св}}$, увеличение $F_{\text{св}}$, увеличение скорости шовной сварки), приводящие к недостаточному выделению тепла в зоне соединения;
- увеличение размеров рабочей поверхности электродов в процессе их эксплуатации;
- сунтирование тока (мал шаг между точками, касание электродов свариваемых деталей или приспособлений вне зоны соединения);
- большая толщина плакирующего слоя или оксидных пленок;
- большой зазор между деталями;
- значительный внутренний выплеск.

К мероприятиям, предупреждающим появление непроваров, относятся операции контроля:

- состояния поверхности свариваемых деталей;
- состояния и размеров рабочих поверхностей электродов;
- качества сборки;
- параметров режима сварки и их корректировка — целесообразно предусмотреть автоматический активный контроль процесса сварки.

Выплески — весьма распространенный дефект контактной сварки. Они опасны тем, что частицы выброшенного из соединения металла, попадая в полость изделия (прибора), могут нарушить его работу. Кроме этого, выплески повышают склонность к образованию трещин и раковин, а также снижают стойкость электродов. Выплески разделяют на наружные — из зоны контакта электрод — деталь и внутренние — между деталями.

Наружные выплески обычно не связаны с литой зоной, а вызываются интенсивным выделением теплоты в контакте электрод–деталь (рис. 11.14е, ж). Они возникают при малых силах сжатия деталей, перекосах деталей между электродами, неудовлетворительном состоянии поверхности деталей или электродов, а также при сварке на форсированных режимах с получением чрезмерно большой литой зоны и, особенно, при односторонней сварке с малым шагом между точками (рис. 11.14к).

Внутренние выплески наиболее распространены при точечной, шовной и рельефной сварке металлов с высокой прочностью (жаропрочные сплавы, стали в закаленном и нагартованном состоянии, высокопрочные алюминиевые сплавы и т. п.), а также деталей с плохой подготовкой поверхности. Различают начальные и конечные внутренние выплески.

Начальные выплески связаны с интенсивным расплавлением металла в контакте деталь — деталь, имеющем высокое и нестабильное сопротивление на начальном этапе процесса сварки при несформировавшемся уплотнительном пояске (рис. 11.14з). Начальный внутренний выплеск приводит к увеличению площади контакта деталь — деталь, уменьшающего плотность тока и, как

следствие, к непровару, особенно при сварке на жестких режимах металлов с низким электрическим сопротивлением.

Конечные выплески происходят на завершающей стадии процесса сварки и связаны с локальным прорывом жидкого металла ядра через уплотнительный пояс (рис. 11.14и). Этому способствуют: силы, стремящиеся раскрыть зазор между соединяемыми деталями при расплавлении ядра (дилатометрический эффект) и высокое давление металла расплавленного ядра.

Внутренние выплески обычно сопровождаются образованием раковин, глубоких вмятин, а в случае сварки высокопрочных алюминиевых сплавов — внутренних или наружных трещин, уменьшением объема ядра и его диаметра.

Мерами предупреждения выплесков могут быть:

- повышение $F_{\text{св}}$;
- снижение скорости нагрева на начальной и конечной стадии процесса сварки за счет плавного изменения сварочного тока;
- применение мягких режимов сварки;
- обжатие металла вокруг электрода (в области уплотнительного пояса) за счет использования специальных составных электродов с обжимной втулкой (рис. 11.8д);
- обеспечение большей подвижности электрода;
- выбор параметров режима, не допускающих появление диаметра ядра больше $d_{\text{кр}} = (1,2 \dots 1,3) \cdot d_{\text{ном}}$.

Трещины, раковины, рыхлоты возникают на этапе кристаллизации и охлаждения расплавленного металла ядра. Наиболее опасным дефектом являются *горячие трещины*. Они образуются в температурном интервале хрупкости (ТИХ) при наличии значительных растягивающих напряжений, вызванных усадкой расплавленного металла. Обычно трещины распространяются от центра ядра в радиальном или осевом направлениях (рис. 11.14л). К образованию горячих трещин наиболее склонны высокопрочные алюминиевые сплавы с широким температурным интервалом кристаллизации, особенно при большом объеме расплавленного металла ядра.

Уменьшение плотности ядра (раковины, рыхлоты), кроме явлений усадочного характера, связано с интенсивными внутренними выплесками.

Основным способом предупреждения образования несплошностей в зоне соединения, обеспечивающим снижение растягивающих напряжений, является применение ковочной силы. Приложение $F_{\text{к}}$ должно совпадать с началом кристаллизации металла и сохраняться до полного охлаждения зоны соединения. При выборе величины ковочной силы и времени ее приложения ($t_{\text{к}}$) следует учитывать теплофизические и механические свойства металла, толщину деталей, режим сварки, форму импульса сварочного тока. Большие скорости кристаллизации, например при сварке металлов с высокой теплопроводностью, требуют увеличения $F_{\text{к}}$ и уменьшения $t_{\text{к}}$. С ростом толщины деталей $F_{\text{к}}$ и $t_{\text{к}}$ возрастают. Переход к более жестким режимам должен сопровождаться повышением $F_{\text{к}}$ и снижением $t_{\text{к}}$.

Кроме рассмотренных, в соединениях, выполненных точечной, шовной и рельефной сваркой, встречаются следующие дефекты:

- склонность к щелевой коррозии, очаг которой находится в зазоре под нахлесткой (предотвратить щелевую коррозию можно за счет герметизации зазоров до или после сварки с помощью грунтов, паст, клеев, а также пайкой — клее-сварные, паяно-сварные соединения);
- снижение коррозионной стойкости в результате массопереноса части электродного металла на поверхность вмятины или нарушения покрытия, например при сварке оцинкованных сталей (восстанавливаются местной металлизацией);
- неблагоприятные изменения структуры металла ядра и околошовной зоны (рост зерна, закалка, разупрочнение), вызванные термдеформационным воздействием цикла сварки;
- негерметичность соединений при шовной сварке, как правило, связанная с уменьшением размеров литого ядра и перекрытия точек из-за отклонения параметров режима (уменьшение $I_{св}$ и $t_{имп}$, увеличение $V_{св}$ и $t_{п}$);
- перегрев и выплески при многорельефной сварке из-за нестабильных размеров рельефов по высоте.

Число и характер допустимых дефектов определяются техническими условиями и зависят от ответственности конструкции. Исправление дефектов контактной сварки — трудоемкий процесс. Например, для устранения деформаций (коробления) узла применяют термическую, термомеханическую или механическую правку. Дефекты точки или шва исправляют сваркой дополнительных точек или наложением параллельного сварного шва. Возможно исправление дефектных соединений способами сварки плавлением или пайкой.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова зависимость параметров режима точечной сварки от теплофизических характеристик свариваемых металлов?
2. Какие вы знаете разновидности циклограмм по силе сжатия и форме импульса тока при точечной сварке?
3. Что вы понимаете под «жестким» и «мягким» режимом контактной сварки, каково их технологическое назначение?
4. Какие существуют варианты взаимного расположения электродов и изделия при точечной сварке, каково их назначение?
5. Каковы технологически приемы, позволяющие управлять температурным полем в зоне соединения при точечной сварке деталей разной толщины?
6. Какие особенности формирования литого ядра при точечной сварке деталей из разнородных металлов одинаковой толщины?
7. Какие особенности процесса шовной сварки по сравнению с точечной?
8. Каково назначение, преимущество и недостатки шовно-шаговой сварки; циклограмма шовно-шаговой сварки?
9. Чем отличаются процессы рельефной сварки от точечной и шовной?
10. Причины склонности рельефной сварки к выплескам; методы борьбы с этим явлением.
11. Перечислите группы основных дефектов соединений при контактной точечной, рельефной и точечной сварке.
12. Каковы основные причины появления типовых дефектов при контактной сварке?
13. Какие меры и способы следует применить для предупреждения образования дефектов при контактной сварке?

ГЛАВА 12 ТЕХНОЛОГИЯ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ

12.1. ПРИМЕНЕНИЕ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ

Контактная стыковая сварка относится к высокопроизводительным способам соединения, выполняется, как правило, автоматически и не требует сварочных материалов. Наибольшее применение получила сварка оплавлением по сравнению со стыковой сваркой сопротивлением, позволяющая сваривать детали с поперечным сечением в сотни и тысячи квадратных миллиметров и получать высокое качество сварных соединений. Стыковую сварку оплавлением используют как в заводских, так и в полевых условиях, при строительстве и ремонте железнодорожных путей, при сооружении газо- и нефтепроводов, нефтяных и газовых скважин на промыслах.

Данный способ сварки позволяет соединять практически все известные металлы и сплавы, обеспечивая высокую стабильность и качество соединения. Это делает ее перспективной при создании современных конструкций ответственного назначения из новых материалов. Развитие контактной стыковой сварки идет по пути расширения как номенклатуры сварных изделий, так и площади их свариваемых поперечных сечений.

В *металлургическом производстве* стыковой сваркой соединяют полосы или ленты, которые затем используют при производстве труб, последующей прокатке или термической обработке, а также проволоку для обеспечения непрерывного процесса волочения.

В *инструментальном производстве* с применением стыковой сварки изготавливают сверла, фрезы, и т. д., режущая часть которых делается из дорогой инструментальной стали, а хвостовая часть — из дешевой углеродистой.

В *энергетическом машиностроении* стыковую сварку применяют для соединения труб при изготовлении котлов и другого нагревательного оборудования.

Стыковую сварку оплавлением используют для соединения рельсов в длинные плети при строительстве и ремонте железнодорожных путей. Длина сварных плетей рельсов составляет 600...1200 м. Их применение на 30% снижает разрушение рельсов, на 10% снижает сопротивление движению из-за отсутствия стыков между рельсами, повышает комфортность проезда в пассажирском вагоне.

При строительстве *магистральных трубопроводов* стыковая сварка была применена для соединения труб диаметром 1420 мм. Для этих целей Институтом Электросварки им. Е. О. Патона был разработан комплекс «Север-1», позволяющий выполнять сварку одного стыка трубы за 5 мин.

В строительстве стыковую сварку применяют для соединения арматурных стержней при изготовлении арматурных сеток, каркасов железобетонных труб и т. д.

12.2. ВЫБОР СПОСОБА СТЫКОВОЙ СВАРКИ. КОНСТРУИРОВАНИЕ И ПОДГОТОВКА ДЕТАЛЕЙ К СВАРКЕ

Применимость стыковой контактной сварки для изготовления сварной конструкции необходимо оценить с *технологических и конструктивных* позиций с учетом *экономических* затрат.

В *технологическом плане* применение *стыковой сварки* зависит от типа материала деталей, а также от формы и размера их поперечных сечений. При выборе способа стыковой сварки необходимо учитывать *достоинства и недостатки сварки сопротивлением и оплавлением* в сопоставлении друг с другом.

Стыковая сварка оплавлением имеет следующие основные достоинства перед сваркой сопротивлением:

- возможность соединения деталей с большим поперечным сечением (до десятков и сотен тысяч мм²) различных форм;
- получение высокого и стабильного качества сварных соединений на уровне свойств основного металла;
- возможность сварки сплавов, которые даже в нагретом состоянии имеют ограниченную пластичность, например чугуны;
- простота подготовки торцов деталей к сварке.

Основными недостатками сварки оплавлением являются:

- трудность управления процессом сварки из-за большого количества параметров режима, которые необходимо выдерживать в оптимальных пределах;
- ухудшенная форма стыка из-за резко выступающего грата с острыми кромками, который, как правило, необходимо снимать;
- потери металла и энергии при оплавлении;
- сложность оборудования.

Сварка сопротивлением характеризуется следующими достоинствами:

- плавные очертания грата, который можно, например, не удалять внутри трубы;
- меньшие потери металла (только на осадку);
- простота оборудования.

Более существенными являются недостатки стыковой сварки сопротивлением:

- повышенная окисляемость металла при нагреве в отсутствии внешней защиты, усиливающаяся при сварке деталей с развитым сечением (труба, полого), что дестабилизирует прочность сварного соединения;
- ограниченные размеры поперечных сечений свариваемых деталей (до 200...300 мм² для углеродистых и низколегированных сталей без внешней защиты и до 50...100 мм² для высоколегированных сталей и цветных металлов);
- более сложная подготовка торцов деталей к сварке.

Выбор способа стыковой сварки позволяет определить для свариваемых деталей такие важные параметры процесса, как установочную длину и припуски на осадку (при сварке сопротивлением) или на оплавление и осадку (при сварке оплавлением), которые учитываются при конструировании деталей под сварку.

С конструктивных позиций применимость *стыковой сварки* зависит от длины свариваемых деталей. Минимальная длина l_{\min} с учетом припуска на осадку или на оплавление и осадку должна позволить зажатие детали в электродных губках (электродах) контактной машины, обеспечив при этом требуемую установочную длину (см. рис. 10.1), т. е.

$$l_{\min} = l_{\text{эг}} + l_y,$$

где $l_{\text{эг}}$ — длина для зажатия в электродах; l_y — установочная длина.

Часть длины деталей, необходимой для зажатия в электродных губках машины $l_{\text{эг}}$, можно определить на предназначенной для сварки машине или оценить по выражению

$$l_{\text{эг}} = k \cdot d,$$

где d — диаметр прутка или трубы в мм; $k = 3...4$ при сварке прутков, $2...2,5$ — при сварке труб диаметром $20...57$ мм и $1...1,5$ — при сварке труб диаметром $200...300$ мм.

При сварке полос или листов можно принять:

$$l_{\text{эг}} = 10 \cdot s,$$

где s — толщина полосы или листа в мм.

Установочная длина зависит от типа сортамента (пруток, полоса, труба и т. д.), его характерного размера (диаметр, толщина) и материала и рассмотрена в пунктах 12.3 и 12.4.

Если реальная длина детали равна или больше минимальной, то ограничений для применения стыковой сварки нет. Максимальная длина детали не имеет ограничений по условиям выполнения процесса сварки, но может быть ограничена большим весом детали или размерами сварочного участка. Дальнейшая разработка технологии сварки заданной сварной конструкции производится в соответствии с ее чертежом.

Чертеж сварной конструкции содержит условное изображение сварных швов в соответствии с ГОСТ 2.312-72. Применительно к стыковой контактной сварке нет стандарта на конструктивные элементы сварного соединения. Поэтому соединение, выполненное стыковой сваркой, обозначают на чертеже по ГОСТ 2.312-72 как нестандартный шов в соответствии с приложением № 2 (рис. 12.1).

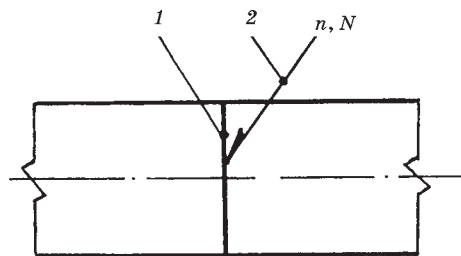


Рис. 12.1

Изображение и обозначение на чертеже сварного соединения, выполненного стыковой сваркой:

1 — графическое изображение стыка; 2 — линия-выноска с односторонней стрелкой и горизонтальной полкой; N — номер пункта технических требований чертежа, в котором содержатся сведения о способе сварки.

Сварной стык изображается сплошной основной линией. От изображения стыка проводится линия-выноска с односторонней стрелкой и горизонтальной полкой. В пункте технических требований чертежа, номер которого указан на горизонтальной полке, пишут: стыковая контактная сварка оплавлением (сопротивлением).

Подготовка деталей к сварке включает обработку их концевых частей, которые участвуют в образовании сварного соединения.

В процессе осадки детали должны в равной степени пластически деформироваться для более полного удаления оксидов из стыка. Протекание равновеликой деформации при осадке нарушается в случае сварки деталей с разными формами и размерами поперечных сечений (рис. 12.2а), поэтому концевую часть массивной детали необходимо обработать на длине l_0 по размерам другой свариваемой детали (рис. 12.2б). Допускается сваривать детали, если их различие в диаметрах не превышает 15%, а по толщине — 10%.

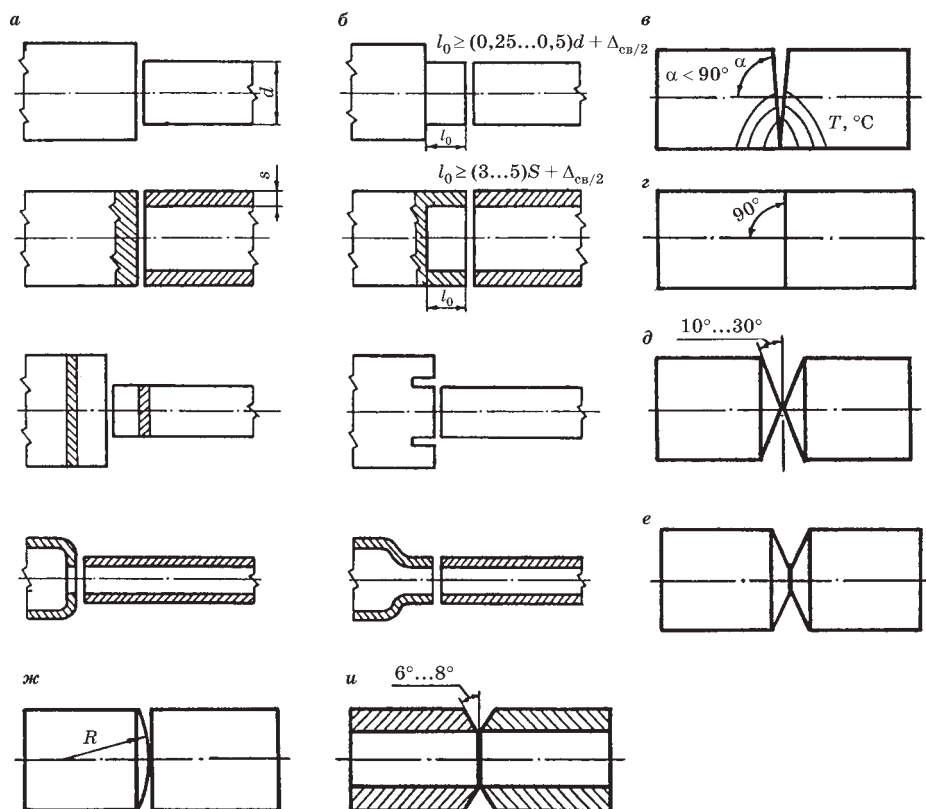


Рис. 12.2

Подготовка деталей для стыковой сварки:

а — нерациональная подготовка; б — выравнивание формы и размеров поперечного сечения деталей; в — неточная обработка торцов; г, д, е, ж, и — подготовка торцов для стыковой сварки сопротивлением; d и s — диаметр и толщина стенки; $\Delta_{св}$ — суммарное укорочение обеих деталей при сварке; T — изотермы температурного поля.

Стыковой сваркой оплавлением сваривают детали с торцевыми поверхностями, полученными после механической резки на ножницах, пилах, токарных и строгальных станках, а также после плазменной и другой термической резки с очисткой места реза от грат.

Более тщательная подготовка торцовых поверхностей требуется при сварке сопротивлением (рис. 12.2г, д, е, ж, и). При плоской форме торцов контакт между ними при сжатии образуется, как правило, не по всей поверхности, а в отдельной зоне из-за неточной обработки (рис. 12.2в). Это вызывает несимметричное относительно осей деталей выделение тепла, неравномерный нагрев по сечению и неодинаковый нагрев по длине торцов. Плоскую поверхность торцов с углом $\alpha = 90^\circ$ (рис. 12.2г) следует использовать при сварке прутков диаметром до 10 мм. При большем диаметре обработку следует производить на конус или сферу (рис. 12.2д, е, ж, и). Более сложным является процесс сварки труб. Стенки трубы перед осадкой необходимо равномерно нагреть по периметру торцов и их длине. Это достигается обработкой торца трубы на конус (рис. 12.2и).

В подготовку входит также очистка боковых поверхностей деталей от ржавчины, окалины и прочих загрязнений на длине, начиная от торца до окончания поверхности, зажимаемой в электродных губках. Это необходимо для создания надежного электрического контакта электрод — деталь, что снижает выделение тепла в данных контактах и по этой причине уменьшает износ электродных губок и исключает повреждение поверхностей деталей (пригар).

12.3. ЦИКЛОГРАММЫ, ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА И ТЕХНИКА СТЫКОВОЙ СВАРКИ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Параметрами режима стыковой сварки сопротивлением являются: установочная длина l_y , сварочный ток $I_{св}$ или его плотность $j_{св}$, сила сжатия деталей при нагреве F_n или давление нагрева p_n , время нагрева t_n , сила сжатия деталей при осадке $F_{ос}$ или давление осадки $p_{ос}$, припуск на осадку $\Delta_{ос}$, включающий осадку под током $\Delta_{ос\text{ п/т}}$ и без тока $\Delta_{ос\text{ б/т}}$.

Плотность тока и давление удобно использовать для задания параметров режима сварки деталей из одного и того же материала, однотипных по форме, но различных по величине поперечного сечения (например, прутков, полос и т. д.).

На рисунке 12.3 представлены типовые циклограммы стыковой сварки сопротивлением. Циклограмма показывает организацию сварочного цикла. Детали вначале сжимают заданной силой. После стабилизации силы сжатия и, следовательно, контактного сопротивления деталь — деталь включается сварочный ток, длительность протекания которого определяется либо величиной осадки под током, либо заданным временем. Включение сварочного тока до стабилизации силы сжатия деталей нарушает и может вообще исключить образование сварного соединения. При малой силе сжатия деталей по сравнению с ее оптимальным значением резко повышается контактное сопротивление деталь — деталь и выделение на нем тепла. Это может вызвать расплавление большого объема металла в зоне стыка и его выдавливание, что нарушает процесс осадки и формирование качественного сварного соединения.

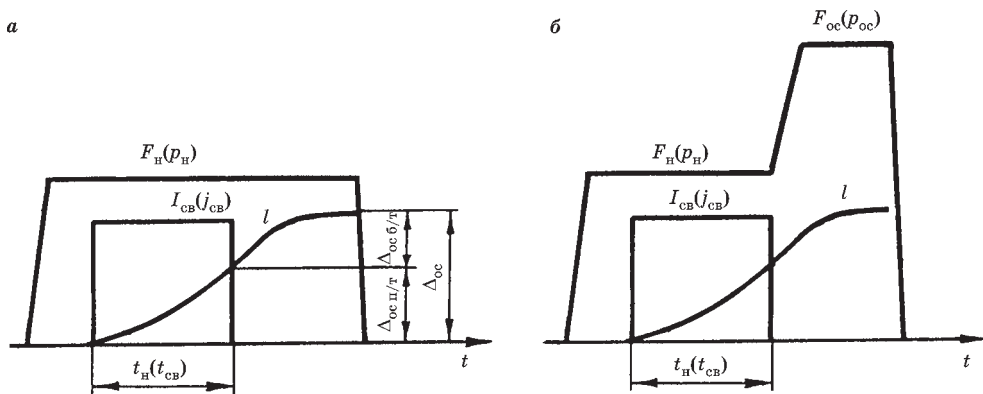


Рис. 12.3
Циклограммы стыковой сварки сопротивлением:

a — с постоянным давлением сжатия деталей; *б* — с переменным давлением сжатия деталей; $F_n(p_n)$, $F_{oc}(p_{oc})$ — силы (давления) при нагреве и осадке; $I_{cb}(j_{cb})$ — сварочный ток (плотность сварочного тока); $t_n(t_{cb})$ — время нагрева (сварки); l — перемещение подвижной плиты машины с деталью; Δ_{oc} — припуск на осадку; $\Delta_{oc\text{ п/т}}$, $\Delta_{oc\text{ б/т}}$ — осадка под током и без тока.

Простейшую циклограмму (рис. 12.3*а*) с постоянной силой сжатия деталей или с постоянным давлением используют при сварке со свободной осадкой (рис. 10.3*а*) проволоки из сталей всех типов и цветных металлов и прутков диаметром 8...10 мм из материалов с невысоким сопротивлением пластической деформации (например, из углеродистой стали). При этом сила, действующая при нагреве F_n , обеспечивает протекание процесса осадки в пределах оптимального припуска.

Циклограмму с переменной силой сжатия деталей или с переменным давлением (рис. 12.3*б*) используют при сварке прутков повышенного сечения диаметром 10...20 мм, труб диаметром до 32×5,5 мм и во всех других случаях, когда осадка выполняется со срезанием грата. Для осадки в подобных условиях необходима повышенная сила сжатия. Стыковая сварка сопротивлением характеризуется большим количеством параметров режима, чем точечная или шовная. Каждый параметр режима влияет на качество сварного соединения.

Установочная длина l_y зависит от формы поперечного сечения деталей (пруток, труба, полоса) и тепло-электропроводности материала.

Уменьшенная установочная длина снижает ширину зоны нагрева и увеличивает градиент температуры по оси детали (рис. 10.2*д*), что затрудняет пластическую деформацию при осадке и не обеспечивает полного выдавливания оксидов из стыка. При этом также возрастают потери тепла в электродные губки машины.

Повышенная установочная длина дает широкую зону нагрева (рис. 10.2*е*), что снижает локальность пластической деформации в зоне стыка и эффективность выдавливания из него оксидов и загрязнений. При этом возможно искривление деталей при осадке из-за потери устойчивости.

Для прутков диаметром $d > 8$ мм оптимальные значения установочной длины составляют: для сталей $l_y = (0,7...1) \cdot d$, для алюминия и латуни — $l_y = (1,5...2) \cdot d$, для меди — $l_y = (2,5...4) \cdot d$. Для проволоки из сталей

диаметром $d < 8$ мм указанные значения необходимо увеличить на 20...60%, при этом степень увеличения возрастает с уменьшением диаметра. Установочную длину для труб при сварке сопротивлением следует принимать в пределах $l_y = (5...6) \cdot s$, где s — толщина стенки трубы.

Правильный выбор установочной длины имеет большое значение при сварке разнородных сталей и разноименных металлов, которые могут иметь большие различия по тепло- и электропроводности, сопротивлению пластической деформации и температуре плавления. Если материалы деталей имеют примерно близкие температуры плавления, то необходимо, чтобы деталь из более тепло- и электропроводного металла имела большую установочную длину, т. е. для обеих деталей установочную длину необходимо выбирать с учетом их материала по ранее приведенным рекомендациям.

Время нагрева t_n (время сварки $t_{св}$) при сварке сопротивлением необходимо минимизировать для уменьшения окисления металла. Это наиболее важно для металлов, дающих трудноудаляемые оксиды (легированные стали, цветные металлы).

В таблице 12.1 приведены оптимальные значения времени нагрева (сварки) стержней из углеродистых сталей.

Таблица 12.1

Плотность тока и длительность его протекания при сварке сопротивлением стержней из углеродистой стали

Сечение, мм ²	Диаметр, мм	Плотность тока $j_{св}$, А/мм ²	Время нагрева t_n или сварки $t_{св}$, с
25	5,5	200	0,6
50	8	160	0,8
100	11	140	1,0
250	18	90	1,5
500	25	60	2,5
1000	35	40	4,5

При сварке стальных труб диаметром 32×5,5 и прутков из цветных металлов значения времени нагрева t_n возрастают в (2...3) раза по сравнению со стальными прутками равных сечений.

Плотность тока $j_{св}$ при сварке сопротивлением можно ориентировочно определить по эмпирической формуле

$$j_{св} \sqrt{t_n} = k \cdot 10^3,$$

где $j_{св}$ — плотность тока (А/см²); t_n — время нагрева (с); k — коэффициент, равный для сталей 8...10, для алюминия — 20, для меди — 27.

Сочетание величин плотности тока и времени нагрева (сварки) определяет тип режима. При малом времени нагрева и повышенной плотности тока имеет место жесткий режим, а при обратном — мягкий. Имеются и промежуточные типы режимов. Тип режима зависит от свойств материала деталей (тепло- и электропроводности, окисляемости, степени упрочнения или разупрочнения при нагреве и т. д.), а также от величины поперечного сечения деталей. При сварке сопротивлением тип режима смещается в направлении к жесткому из-

за минимизации времени нагрева. Для проволоки из углеродистых сталей диаметром $d = 0,3...3$ мм плотности тока $j_{св}$ достигают $250...700$ А/мм², при этом меньшим диаметрам соответствуют большие плотности тока. При сварке труб из углеродистых и низколегированных сталей из-за повышенного времени нагрева и пониженного отвода тепла в электродные губки по сравнению со стержнями оптимальная плотность тока меньше и составляет $j_{св} = 30...35$ А/мм².

Давление нагрева p_n , с которым детали сжимаются при протекании сварочного тока, оказывает влияние на выделение тепла в контакте деталь — деталь. Пониженное значение p_n создает повышенное контактное сопротивление деталь — деталь, чем вызывает повышенный нагрев металла в области стыка. Повышенное давление p_n , наоборот, снижает контактное сопротивление деталь — деталь и выделение тепла в контакте.

Но с уменьшением давления p_n контакт деталь — деталь становится менее плотным и в него интенсивнее проникает кислород воздуха, усиливая окисление металла на торцах деталей, что затрудняет формирование качественного сварного соединения. Поэтому величину p_n необходимо оптимизировать так, чтобы обеспечить интенсивный нагрев деталей без существенного усиления окисления металла. При сварке с постоянным давлением (рис. 12.3а) давление нагрева p_n имеет следующий порядок величин: для углеродистых и низколегированных сталей (проволока, прутки) — $15...40$ МПа; для легированных сталей (проволока) — $20...50$ МПа; для цветных металлов (проволока, прутки) — $10...20$ МПа. При сварке с переменным давлением сжатия деталей (рис. 12.3б) величина p_n в $2...3$ раза меньше.

Давление осадки $p_{ос}$ должно создать необходимую пластическую деформацию металла, обеспечивающую выдавливание оксидов из стыка. Его величина зависит от материала и схемы осадки. При осадке со свободной деформацией (рис. 10.3а) давление $p_{ос}$ меньше, чем при осадке со срезанием грата (рис. 10.3г). Для углеродистых и низколегированных сталей давление осадки составляет $100...150$ МПа, для высоколегированных сталей — $300...400$ МПа, для цветных металлов (со срезанием грата) — $120...350$ МПа.

Пропуск на осадку $\Delta_{ос}$ определяет качество сварного соединения на завершающем этапе его формирования. При сварке сопротивлением осадка начинается под действием давления p_n с момента включения сварочного тока и начала нагрева металла и заканчивается после выключения тока при воздействии давления осадки $p_{ос}$. Таким образом, полная осадка состоит из осадки под током $\Delta_{ос\text{ п/т}}$ и осадки без тока $\Delta_{ос\text{ б/т}}$ (рис. 12.3а). При малой величине осадки $\Delta_{ос}$ в стыке остаются оксиды, дающие непровар. Большая величина осадки вызывает искривление волокон в зоне стыка (рис. 10.3) и отсутствие рекристаллизации металла в стыке по причине выдавливания высоконагретого металла, что снижает качество соединения. Поэтому величину осадки необходимо оптимизировать. При сварке проволоки и прутков рекомендуются следующие значения величины осадки в зависимости от диаметра: для стали — $\Delta_{ос} = (0,8...1,5) \cdot d$; для алюминия и латуни — $\Delta_{ос} = (1,7...2,5) \cdot d$; для меди $\Delta_{ос} = (2,5...4) \cdot d$. При свободной деформации требуемая осадка всегда больше, чем при деформации со срезанием грата (рис. 10.3).

Техника сварки включает совокупность операций и условий, необходимых для выполнения сварного соединения.

Сварка проволоки и прутков из низкоуглеродистых сталей сечением до 300 мм² трудностей не вызывает. При сварке деталей с повышенным поперечным сечением (более 300 мм²) и особенно труб необходимо использовать внешнюю защиту стыка от кислорода воздуха. Для углеродистых и низколегированных сталей в качестве защитных газов используют азот и водород. Химически активные металлы (например, титан) сваривают в инертном защитном газе, как правило, в аргоне.

Максимальную температуру нагрева T_{\max} принимают с учетом температуры плавления $T_{\text{пл}}$ металла или сплава в пределах $(0,8...0,9) \cdot T_{\text{пл}}$. Для низкоуглеродистых сталей максимальная температура нагрева составляет 1200...1300°C, а для высокоуглеродистых 1050...1150°C. Для контроля нагрева металла до оптимальной температуры используют, как правило, один из двух факторов: величину осадки под током или дозирование времени протекания сварочного тока. Более точный контроль нагрева металла осуществляют приборами для измерения температуры, например, пирометрами.

Определение *оптимальных параметров режима сварки* соединения из данного материала выполняется на образцах материал, форма и размеры которых соответствуют реальному сварному соединению. Сварку выполняют на ориентировочных параметрах режима, определенных по рассмотренным рекомендациям или по литературным данным. После сварки исследуют качество сварного образца (образцов): структуру, механические свойства, коррозионную стойкость и т. д. При недостаточном качестве выполняют варьирование параметров режима с одновременной оценкой качества соединения. Параметры, обеспечивающие требуемое качество сварного соединения, считаются оптимальными. Оптимизация параметров режима может выполняться в совокупности с термообработкой сварного соединения после сварки, без которой бывает невозможно получить нужное качество. Термообработку целесообразно проводить в электродах машины, производя нагрев до нужной температуры пропусканием импульса тока.

12.4. ЦИКЛОГРАММА, ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА И ТЕХНИКА СТЫКОВОЙ СВАРКИ ОПЛАВЛЕНИЕМ

Циклограмма, характеризующая протекание процесса стыковой сварки непрерывным оплавлением, рассмотренного в пункте 10.3, показана на рисунке 12.4.

Она показывает организацию сварочного цикла и содержит следующие временные фазы:

- оплавление, в процессе которого на торцах деталей образуются слои расплавленного металла;
- осадку, протекающую частично под током ($\Delta_{\text{ос п/т}}$) и без тока ($\Delta_{\text{ос б/т}}$), в ходе которой происходит формирование сварного соединения;
- выдержку (проковку), в течение которой сварное соединение некоторое время выдерживается под давлением, а затем извлекается из электродов машины;
- возврат, в ходе которого подвижная плита контактной машины с расположенным на ней электродом возвращается в исходное положение.

Основными фазами циклограммы, определяющими формирование сварного соединения, являются оплавление и осадка.

Параметрами режима стыковой сварки непрерывным оплавлением являются: установочная длина l_y , давление оплавления $p_{\text{опл}}$, скорость оплавления $V_{\text{опл}}$, ток (плотность тока) оплавления $I_{\text{опл}} (j_{\text{опл}})$, припуск на оплавление $\Delta_{\text{опл}}$, скорость осадки $V_{\text{ос}}$, ток (плотность тока) осадки $I_{\text{ос}} (j_{\text{ос}})$, припуск на общую осадку $\Delta_{\text{ос}}$, состоящую из осадки под током $\Delta_{\text{ос п/т}}$ и без тока $\Delta_{\text{ос б/т}}$, давление осадки $p_{\text{ос}}$, время выдержки (проковки) сварного соединения под давлением в электродах машины для охлаждения.

Как видно из данного перечисления, параметры режима имеют привязку к основным фазам цикла сварки — к оплавлению и к осадке.

Сварка оплавлением имеет больше параметров режима, чем сварка сопротивлением, что делает ее более трудно управляемым процессом из всех способов контактной сварки. Каждый параметр режима необходимо поддерживать в оптимальных пределах в процессе сварки.

Установочная длина l_y зависит от типа материала, т. е. его теплопроводности и формы и размеров поперечного сечения деталей.

Материалы с повышенной теплопроводностью (цветные металлы) требуют увеличенную установочную длину, чтобы снизить потери тепла в электроды и обеспечить прогрев деталей на требуемую глубину до температур высокой пластичности $T_{\text{min}} \dots T_{\text{max}}$ (рис. 10.2а).

Отклонения установочной длины в меньшую или большую сторону от оптимального значения вызывают такие же нарушения процесса, как и при сварке сопротивлением (см. п. 12.3), приводящие к снижению качества сварного соединения. Для прутков из стали диаметром d значение установочной длины составляет $l_y = (0,7 \dots 1,0) \cdot d$, а из алюминия и латуни $l_y = (2,5 \dots 3,5) \cdot d$. Для стальных труб диаметром D и с толщиной стенки $s = 2 \dots 8$ мм установочную длину принимают в пределах $l_y = (4 \dots 7) \cdot s$, для полос и листов из стали толщиной s принимают $l_y = (3 \dots 5) \cdot s$, а из алюминия и латуни — $l_y = (4,5 \dots 8) \cdot s$.

Давление оплавления $p_{\text{опл}}$ имеет малую величину (примерно 0,01 МПа), чтобы в зазоре между торцами деталей обеспечить ограниченное количество одновременно существующих металлических контактов. Оно не зависит от типа материала деталей и их формы и размеров поперечных сечений.

Скорость оплавления $V_{\text{опл}}$ зависит от типа материала, размера и формы поперечного сечения деталей. На циклограмме (рис. 12.4) скорость оплавления не указывается. Вместо нее наносится график перемещения подвижной детали l , производная от которого равна скорости оплавления.

Материалы, дающие при окислении тугоплавкие и трудноудаляемые при осадке оксиды хрома, кремния, алюминия, марганца, необходимо сваривать при повышенных скоростях оплавления для обеспечения лучшей защиты зоны сварки выделяющимися парами металла и быстрого обновления расплавленного металла на торцах деталей.

Повышенная теплопроводность материала требует повышенной скорости оплавления для предупреждения кристаллизации жидкого металла на торцах перед осадкой.

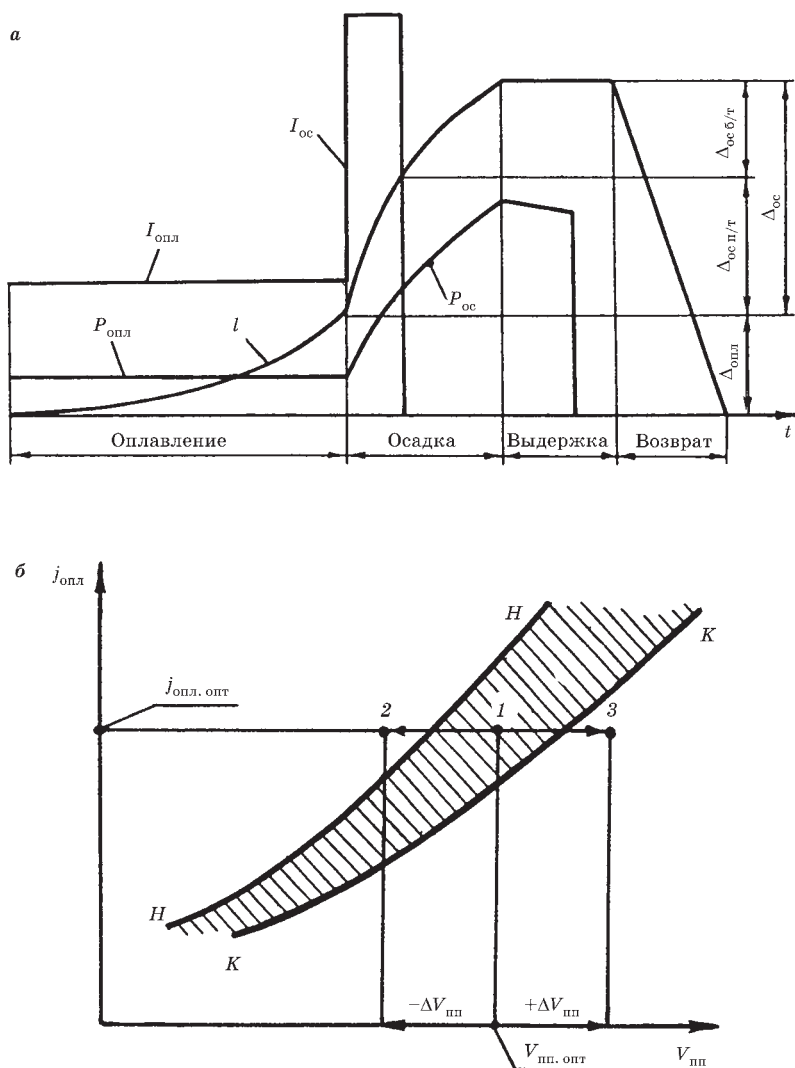


Рис. 12.4

Циклограмма стыковой сварки непрерывным оплавлением (а) и область устойчивого непрерывного оплавления (б):

t — время; $I_{\text{опл}}$, $I_{\text{ос}}$ — токи оплавления и осадки; $P_{\text{опл}}$, $P_{\text{ос}}$ — давления оплавления и осадки; $\Delta_{\text{опл}}$, $\Delta_{\text{ос}}$ — припуски на оплавление и осадку; $\Delta_{\text{ос п/т}}$, $\Delta_{\text{ос б/т}}$ — припуск на осадку под током и без тока; l — перемещение подвижной детали; $V_{\text{пп}}$ — скорость перемещения подвижной плиты; $j_{\text{опл}}$ — плотность тока оплавления; выше линии $H-H$ — оплавление с перерывами; ниже линии $K-K$ — короткое замыкание деталей; 1 — устойчивое оплавление при $j_{\text{опл. опт}}$ и $V_{\text{пп. опт}}$; 2 — оплавление с перерывами; 3 — переход в сварку сопротивлением.

Недостатком высоких скоростей оплавления является образование глубоких кратеров на оплавляемых поверхностях от интенсивных взрывов жидких перемычек, что затрудняет выдавливание жидкого металла из стыка при осадке, приводя к его захлопыванию в замкнутых объемах.

Развитая форма поперечного сечения деталей (труба, полоса, лист) требует более высокой скорости оплавления для снижения окисления металла. Скорость оплавления меняется от малых значений в начале оплавления (сотые и десятые доли мм/с) из-за холодного состояния металла до повышенных значений перед осадкой (примерно в несколько раз больше по сравнению со средними) вследствие его нагрева. Средние скорости оплавления по основным типам материалов имеют следующие значения: для низкоуглеродистых сталей $V_{\text{опл. ср}} = 1...2,5$ мм/с, для высокоуглеродистых сталей и чугуна — $V_{\text{опл. ср}} = 0,5...1,5$ мм/с, для легированных сталей $V_{\text{опл. ср}} = 2,5...3,5$ мм/с при $V_{\text{опл. кон}}$ до 8 мм/с; для алюминия $V_{\text{опл. ср}} = 3...5$ мм/с при $V_{\text{опл. кон}}$ до 20 мм/с; для меди и латуни — $V_{\text{опл. ср}} = 6...8$ мм/с при $V_{\text{опл. кон}}$ до 25 мм/с. При сварке труб, полос и листов средние скорости оплавления соответствуют верхним пределам.

Ток оплавления $I_{\text{опл}}$ обеспечивает нагрев и оплавление металла на торцах деталей в соответствии с выбранной скоростью оплавления. Более универсальной характеристикой является плотность тока $j_{\text{опл}}$.

Плотность тока $j_{\text{опл}}$ возрастает с увеличением тепло- и электропроводности металла и скорости оплавления. Для основных групп материалов применяются следующие средние значения плотности тока: для низкоуглеродистых и низколегированных сталей $j_{\text{опл. ср}} = 8...30$ А/мм²; для высоколегированных сталей — $j_{\text{опл. ср}} = 5...10$ А/мм²; для алюминия и его сплавов — $j_{\text{опл. ср}} = 20...50$ А/мм²; для меди и ее сплавов — $j_{\text{опл. ср}} = 50...80$ А/мм².

Непрерывное оплавление обеспечивается оптимальным соотношением между *плотностью тока* и *скоростью оплавления*, которая должна быть равна скорости перемещения подвижной плиты контактной машины с закрепленной на ней подвижной деталью (рис. 12.4б).

Скорость оплавления определяется физическими процессами выделения тепла, нагрева и плавления материала деталей. Скорость перемещения подвижной плиты $V_{\text{пл}}$ задается механизмом привода перемещения контактной машины. Обеспечение равенства данных скоростей, имеющих разную физическую природу, представляет определенные трудности. Наиболее часто перемещение l подвижной детали во времени задают функцией:

$$l = k \cdot t^n,$$

где n и k — коэффициенты, зависящие от материала деталей.

Например, для углеродистых сталей принимают $n = 2$ и $k = 0,5...1,5$, а для аустенитных — $n = 2,5$ и $k = 2,5...3$. Скорость перемещения $V_{\text{пл}}$ определяется как производная от функции l . В точке 1 (рис. 12.4б) выполняется равенство скоростей сближения деталей $V_{\text{пл}}$ и их укорочение от оплавления $V_{\text{опл}}$, при этом имеет место устойчивое оплавление.

Уменьшение скорости подвижной плиты $V_{\text{пл}}$ на $(-\Delta V_{\text{пл}})$ приводит к уменьшению количества металла, подаваемого в зону контакта деталь — деталь, где он подвергается расплавлению. При этом торцы оплавляются быстрее, чем сближаются, что приводит к расширению зазора между ними, к разрыву цепи тока и к прекращению оплавления. Затем торцы сближаются вновь под действием $V_{\text{пл}}$, оплавление возобновляется и т. д. В точке 2 протекает прерывистое оплавление с повышенным окислением металла.

При увеличении скорости $V_{\text{сп}}$ возрастает количество поступающего металла в зону контакта деталь — деталь, который не успевает переплавляться, т. к. тепловая мощность источника, действующего в данном контакте, осталась прежней из-за неизменной плотности тока. Поэтому зазор между поверхностями торцов деталей сокращается, а сами поверхности через некоторое время переходят в состояние короткого замыкания. Таким образом, в точке 3 (рис. 12.4) сварка оплавлением переходит в сварку сопротивлением.

Припуск на оплавление $\Delta_{\text{опл}}$, зависящий от типа материала, формы и размеров поперечного сечения деталей, необходим для прогрева деталей вглубину удаления начальных оксидов за счет взрывообразного разрушения контактов, выравнивания торцовых поверхностей деталей и создания на них слоя расплавленного металла перед осадкой. При уменьшенном значении $\Delta_{\text{опл}}$ получается недостаточный прогрев металла вглубину, а увеличенное значение $\Delta_{\text{опл}}$ вызывает лишние потери металла и энергии. Для стержней из стали диаметром $d = 5 \dots 50$ мм припуск на оплавление обеих деталей составляет $\Delta_{\text{опл}} = (0,4 \dots 0,9) \cdot d$, а из латуни при $d = 12 \dots 21$ мм — $\Delta_{\text{опл}} = (0,7 \dots 1,2) \cdot d$. При сварке стальных труб припуск на оплавление принимается в пределах $\Delta_{\text{опл}} = (2 \dots 4) \cdot s$, где s — толщина стенки трубы.

Для полос и листов толщиной s припуск на оплавление обеих деталей в зависимости от типа материала принимается следующим: для сталей $\Delta_{\text{опл}} = (2 \dots 6) \cdot s$, для алюминия $\Delta_{\text{опл}} = (4 \dots 10) \cdot s$. К выбранному значению припуска необходимо добивать величину $\Delta = 0,003 B$, где B — ширина полосы или листа в мм, связанную с перпендикулярностью обрезанной под сварку кромки по отношению к продольной оси полосы.

Скорость осадки $V_{\text{ос}}$ должна иметь высокое значение, особенно в начальный момент, чтобы быстро захлопнуть зазор между оплавленными торцами деталей и не допустить этим окисления и преждевременной кристаллизация расплавленного металла. Значения скорости осадки возрастают с ростом склонности металла к окислению и образованию трудноудаляемых оксидов при осадке. Для прутков из низкоуглеродистых сталей используют сравнительно небольшие начальные скорости осадки $V_{\text{ос}} = 15 \dots 30$ мм/с, а для полос и труб из данных сталей — $V_{\text{ос}} = 30 \dots 80$ мм/с. Для высоколегированных сталей (прутки, трубы, полосы) применяются повышенные начальные скорости осадки $V_{\text{ос}} = 50 \dots 120$ мм/с, причем верхние пределы используются при сварке полос. Наиболее высокие начальные скорости осадки необходимы при сварке цветных металлов и сплавов: для алюминия и его сплавов $V_{\text{ос}}$ до $150 \dots 200$ мм/с, а для меди и латуни $V_{\text{ос}}$ до 250 мм/с.

Припуск на осадку $\Delta_{\text{ос}}$ включает зазор между торцами деталей, имеющий место при оплавлении, и величину пластической деформации по выравниванию поверхностей торцов и выдавливанию из стыка окисленного и перегретого металла.

При уменьшенном припуске в стыке остаются оксиды и очаги литой структуры с усадочными дефектами. Повышенный припуск на осадку приводит к чрезмерному выдавливанию из стыка нагретого металла, что исключает последующее протекание процесса рекристаллизации в стыке, и к искривлению волокон металла. Величина припуска на осадку зависит от формы поперечного

сечения, материала деталей и вида осадки. Металлы, характеризующиеся высокой склонностью к окислению и ускоренной кристаллизацией, требуют увеличенного припуска на осадку, чтобы выдавить из стыка повышенное количество образовавшихся оксидов.

Виды осадки, применяемые при стыковой сварке оплавлением, показаны на рисунке 12.5. При осадке со свободной деформацией (рис. 12.5а) припуск на осадку больше, чем при осадке со срезанием грат (б) и с принудительным формированием соединения (в).

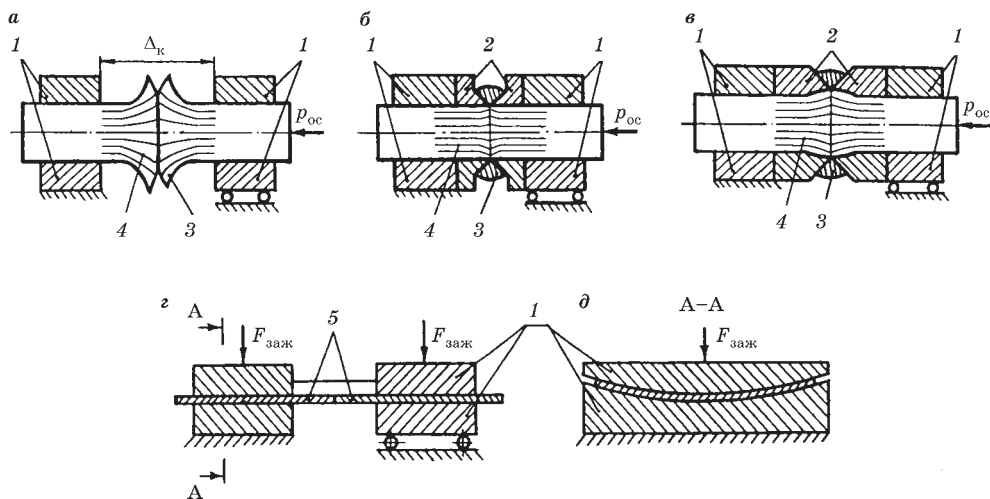


Рис. 12.5

Виды осадки (а, б, в) и сварки тонких листов в профилированных губках (z, д):

а — осадка со свободной деформацией; б — осадка со срезанием грат; в — осадка с принудительным формированием и срезанием грат; Δ_k — расстояние между губками после осадки; p_{oc} — давление осадки; $F_{зак}$ — сила зажатия листов в губках; 1 — электродные губки; 2 — ножи для срезания грат; 3 — грат; 4 — волокна в прокате; 5 — свариваемые листы.

Для стержней из сталей диаметром $d < 50$ мм припуск на осадку составляет $\Delta_{oc} = (0,15...0,4) \cdot d$, а из латуни диаметром $d = 10...21$ мм — $\Delta_{oc} = (0,8...1,2) \cdot d$. При сварке полос и листов из сталей толщиной s припуск на осадку определяется значением $\Delta_{oc} = (1...1,5) \cdot s$, а из алюминия $\Delta_{oc} = (2...4) \cdot s$. Для труб из углеродистых и низколегированных сталей с толщиной стенки $s = 3...10$ мм припуск на осадку определяется значением $\Delta_{oc} = (1...1,6) \cdot s$, а из высоколегированных сталей — $\Delta_{oc} = (1,2...1,4) \cdot s$. Общий припуск на осадку Δ_{oc} делится на осадку под током $\Delta_{oc, п/т} = (0,5...1) \cdot \Delta_{oc}$ и осадку без тока $\Delta_{oc б/т}$ (рис. 12.4а).

Пониженный припуск на осадку под током вызывает недогрев металла и затрудненность его последующей пластической деформации, а повышенный — перегрев и интенсивное выдавливание металла в грат.

Из-за малой осадки без тока происходит неполное удаление из стыка оксидов и перегретого металла, а в сварном соединении образуются остаточные растягивающие напряжения. При большой осадке без тока из стыка удаляется нагретый металл, что исключает процесс рекристаллизации и ослабляет сварное соединение.

После осадки внешним признаком хорошего качества соединения является равномерное распределение грата по периметру стыка. В местах малого грата или его отсутствия с высокой вероятностью образуются непровары из-за оставшихся оксидов.

Ток осадки $I_{ос}$ необходим для дополнительного прогрева деталей вглубину, чтобы обеспечить получение требуемой осадки. Его величина может в 2...4 раза превосходить ток оплавления из-за резкого снижения сопротивления сварочного контура при исчезновении контактного сопротивления деталь — деталь. Длительность протекания тока осадки определяют условно величиной осадки под током $\Delta_{ос\ п/т}$ (рис. 12.4а).

Давление осадки $p_{ос}$ должно обеспечить требуемую пластическую деформацию металла. В зависимости от типа материала и вида осадки (рис. 12.5) давление $p_{ос}$ имеет следующие значения:

- при свободной осадке — для низко- и среднеуглеродистых сталей 60...100 МПа, для низколегированных сталей 100...110 МПа, для высоколегированных сталей 150...220 МПа, для латуни 140...180 МПа;
- при осадке со срезанием грата — для меди 250...400 МПа, для алюминия и его сплавов 130...200 МПа.

Процесс *стыковой сварки оплавлением* характеризуется *определенной техникой*. Детали с обработанными торцами и зачищенными боковыми поверхностями зажимают в электродных губках машины силами в 2...3 раза большими, чем сила осадки. Если электроды имеют упоры, которые удерживают деталь от осевого проскальзывания, то сила зажатия детали в электродах составляет всего половину от силы осадки, что необходимо только для создания электрического контакта между деталью и электродами. Пониженная сила зажатия детали в электродных губках снижает их износ.

Максимальный начальный зазор между торцами деталей перед оплавлением не должен превышать 15% от припуска на оплавление $\Delta_{опл}$. Если зазор больше, то на такую же величину необходимо увеличить припуск $\Delta_{опл}$.

Для сварки изделия из заданного материала необходимо предварительно оптимизировать параметры режима. Оптимизацию параметров режима выполняют так же, как и при стыковой сварке сопротивлением.

Сварку тонких листов, а также труб и стержней диаметром до 30...40 мм выполняют с односторонним токоподводом к электродным губкам (к нижним губкам на рисунке 10.1б). При сварке стержней и труб большего диаметра необходимо обеспечить равномерный по периметру детали подвод тока от электродных губок. Это достигается двухсторонним подводом тока к верхним и нижним электродным губкам.

Сварка тонких листов ($s < 1$ мм) возможна при отношении их ширины B к толщине s в пределах $B/s < 500$. Такие листы следует сваривать в профилированных электродных губках, которые при зажатии изгибают листы так, что их торцы контактируют не по прямой линии, а по кривой (рис. 12.5г, д). Изгиб листов придает им устойчивость при осадке. Несовпадение кромок листов и полос по высоте допускается не более 0,1...0,15 мм.

Грат внутри трубы необходимо удалять до остывания стыка. В трубах из перлитных (углеродистых и низколегированных) сталей грат легко удаляется

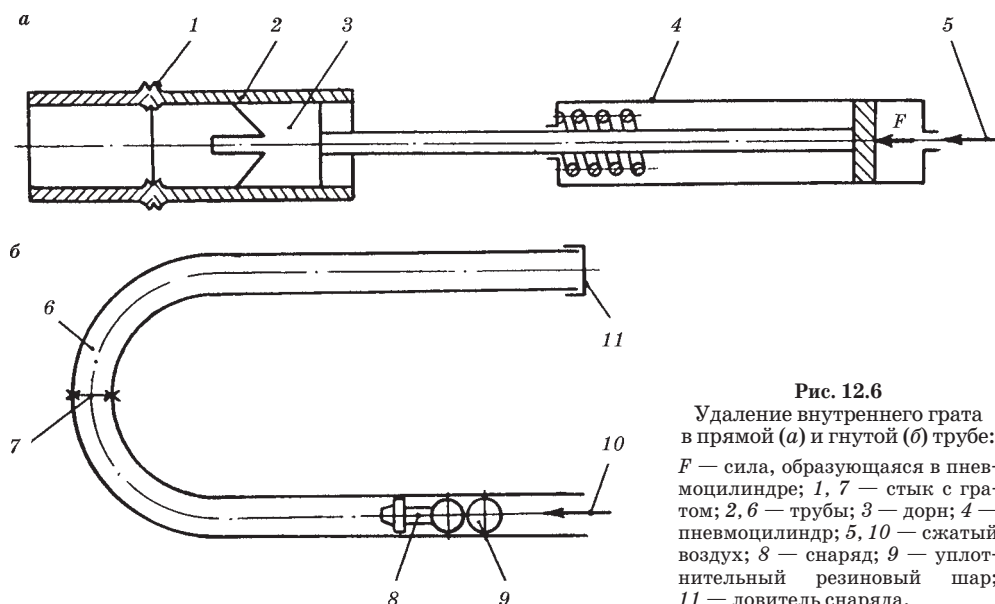


Рис. 12.6
Удаление внутреннего грата в прямой (а) и гнутой (б) трубе:
 F — сила, образующаяся в пневмоцилиндре; 1, 7 — стык с гра-
том; 2, 6 — трубы; 3 — дорн; 4 —
пневмоцилиндр; 5, 10 — сжатый
воздух; 8 — снаряд; 9 — уплот-
нительный резиновый шар;
11 — ловитель снаряда.

продувкой горячего стыка смесью из кислорода (75...80%) и воздуха (25...20%). Продувка выполняется 1...1,5 с. При этом нагретый металл грата интенсивно окисляется и практически полностью «выгорает».

Механическое срезание внутреннего грата выполняется дорном или специальным снарядом. Дорн и снаряд, имеющие острые кромки, перемещаются под действием сил, создаваемых давлением сжатого воздуха (рис. 12.6).

После сварки возможна термообработка сварного соединения в электродных губках машины путем его нагрева импульсом тока.

12.5. МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ НАГРЕВА ПРИ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ ОПЛАВЛЕНИЕМ

Сварку *непрерывным оплавлением* широко используют для соединения деталей с поперечным сечением до 5000 мм². При сварке деталей больших поперечных сечений требуется непропорциональное увеличение времени оплавления, припуска на оплавление и мощности источника сварочного тока для достижения нагрева свариваемых деталей до оптимальной температуры и ширины нагретой зоны. Поэтому для расширения границ применения стыковой сварки оплавлением при соединении деталей с повышенными поперечными сечениями используют методы интенсификации нагрева.

Сварку *непрерывным оплавлением с предварительным подогревом* выполняют для деталей с поперечным сечением (5000...10000) мм².

Способ подогрева показан на рисунке 12.7. Подогрев деталей производится импульсами тока короткого замыкания длительностью 0,5...2 с с такими же примерно паузами в количестве от 3 до 20 импульсов. После подогрева производят оплавление деталей с последующей их осадкой.

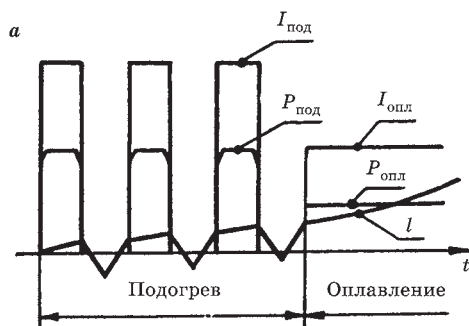
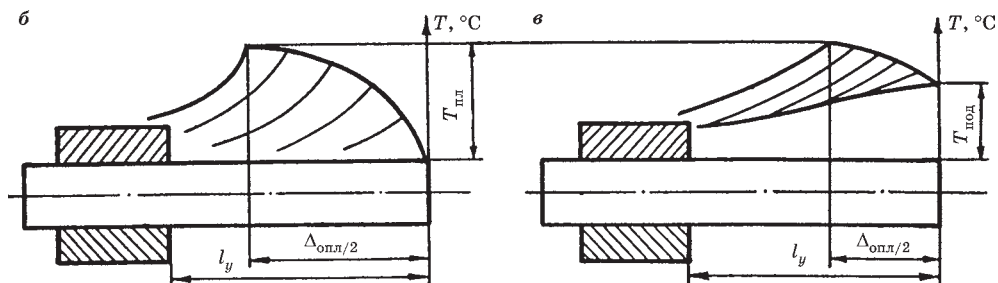


Рис. 12.7

Подогрев деталей перед стыковой сваркой непрерывным оплавлением:

a — подогрев периодическими короткими замыканиями торцов деталей, находящихся под напряжением; *б* и *в* — распределение температуры в деталях при оплавлении без подогрева и с подогревом соответственно; $I_{опл}$, $P_{опл}$, $\Delta_{опл}$ — ток, давление и припуск при оплавлении; $I_{под}$, $P_{под}$ — ток и давление подогрева; l — перемещение подвижной плиты машины с деталью; $T_{пл}$ и $T_{под}$ — температура плавления и подогрева металла; l_y — установочная длина.



Температура подогрева зависит от материала и составляет для углеродистых сталей 800...900°C, а для труднодеформируемых аустенитных сталей — 950...1050°C.

Подогрев снижает плотность тока последующего оплавления, что позволяет сваривать детали с большей площадью поперечного сечения, расширяет зону нагрева, снижая этим давление осадки, замедляет кристаллизацию жидкого металла на торцах, что позволяет уменьшить скорость осадки, снижает в 1,5...3 раза припуск на оплавление (рис. 12.7б, в), а вместе с этим потери металла и энергии. Подогрев благоприятно влияет при сварке закаливающих сталей, снижая скорость их охлаждения и степень закалки, что повышает пластичность сварного соединения.

Недостатком подогрева является неравномерность температуры подогрева при повышенных сечениях деталей с низкой теплопроводностью. Программное регулирование вторичного напряжения источника сварочного тока U_{20} и скорости оплавления $V_{опл}$ позволяет в ходе процесса оплавления интенсифицировать нагрев деталей за счет увеличения длительности существования контактов (жидких перемишек) в зазоре между торцами деталей до их разрушения, в течение которого тепло отводится от контактов вглубь металла деталей, снижая этим потери тепла, связанные с выбросом расплавленного металла контактов при их разрушении. Длительность существования контактов повышается с уменьшением скорости оплавления. При сварке сталей наибольшая интенсификация нагрева достигается при скорости оплавления $V_{опл} = 0,2...0,25$ мм/с.

В начале оплавления, когда металл холодный, даже при низкой скорости оплавления требуется повышенное напряжение источника сварочного тока U_{20}

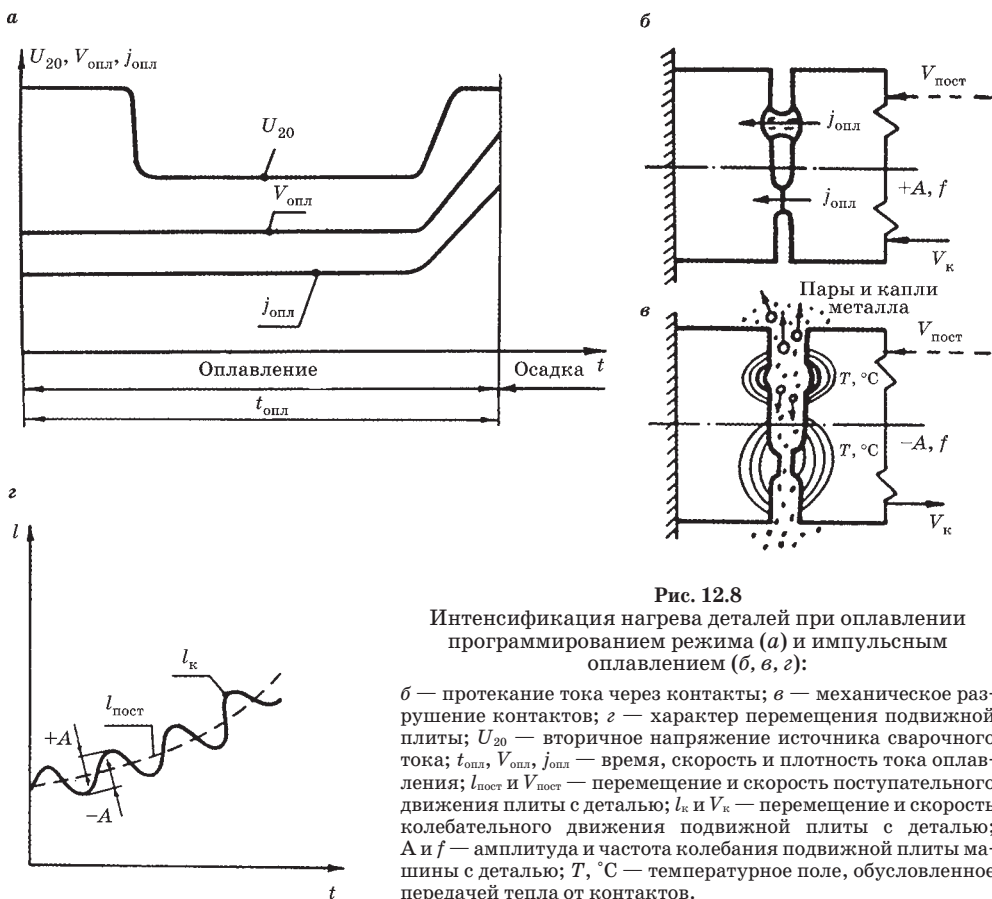


Рис. 12.8
Интенсификация нагрева деталей при оплавлении
программированием режима (а) и импульсным
оплавлением (б, в, г):

б — протекание тока через контакты; в — механическое разрушение контактов; г — характер перемещения подвижной плиты; U_{20} — вторичное напряжение источника сварочного тока; $t_{опл}$, $V_{опл}$, $j_{опл}$ — время, скорость и плотность тока оплавления; $l_{пост}$ и $V_{пост}$ — перемещение и скорость поступательного движения плиты с деталью; l_k и V_k — перемещение и скорость колебательного движения подвижной плиты с деталью; A и f — амплитуда и частота колебания подвижной плиты машины с деталью; $T, ^\circ C$ — температурное поле, обусловленное передачей тепла от контактов.

(рис. 12.8а). После прогрева металла приконтактного слоя до $T = 800...1000^\circ C$ напряжение U_{20} снижают, чтобы сохранить низкую скорость оплавления.

Оплавление на пониженной скорости проводится до оптимального нагрева металла в глубину. Перед осадкой скорость оплавления, а следовательно, и плотность тока оплавления необходимо повысить, чтобы обновить окисленный из-за малоинтенсивного предыдущего оплавления слой жидкого металла на торцах деталей. Увеличение скорости оплавления и плотности тока осуществляется одновременно с повышением вторичного напряжения U_{20} .

Программное регулирование оплавления позволяет сваривать детали сечением свыше $10\,000\text{ мм}^2$. При этом в несколько раз снижаются припуск на оплавление, время оплавления и потребляемая мощность.

Недостатком способа является недоиспользование мощности источника сварочного тока в интервале времени оплавления из-за пониженного вторичного напряжения.

Способ используют для сварки труб диаметром $700...1420\text{ мм}$ при изготовлении магистральных трубопроводов.

Импульсное оплавление интенсифицирует нагрев деталей за счет в основном принудительного характера разрушения контактов между торцами деталей в процессе оплавления, а не естественного.

Естественное взрывообразное разрушение контактов от перегрева и действия электродинамических сил характеризуется большими потерями нагретого металла и тепла.

Принудительное разрушение контактов выполняется механическим путем. Для этого на поступательное перемещение $l_{\text{пост}}$ подвижной детали, перемещающейся со скоростью плиты $V_{\text{пл}}$, накладывается колебательное движение l_k с амплитудой A и частотой f (рис. 12.8з).

На стадии минимального зазора (рис. 12.8б) в твердых и жидких контактах аккумулируется тепло, выделяющееся при протекании через них тока. При разведении деталей (рис. 12.8в) контакты разрушаются механически с минимальным выбросом нагретого металла. Нагретый металл контактов передает свое тепло в глубь деталей, ускоряя этим их прогрев.

Контакты должны частично разрушаться естественным взрывообразным образом для образования вокруг стыка защитной атмосферы и создания расплавленного слоя металла на торцах.

Для интенсификации нагрева используют частоты $f = 10 \dots 100$ Гц при амплитудах колебания $A = 0,1 \dots 0,8$ мм.

При импульсном оплавлении в 3...4 раза снижается время оплавления для достижения нужного нагрева деталей вглубь, в 2...2,5 раза сокращается расход электроэнергии, в 3...4 раза снижается припуск на оплавление. На всей стадии оплавления используется полная мощность источника сварочного тока.

Импульсное оплавление позволяет сваривать детали сечением от 1000 до 100 000 мм². Недостатками данного способа являются сложность и высокая стоимость оборудования. Данный способ используют для сварки железнодорожных рельсов.

12.6. ДЕФЕКТЫ СТЫКОВОЙ СВАРКИ, ПРИЧИНЫ ИХ ПОЯВЛЕНИЯ И МЕТОДЫ УСТРАНЕНИЯ

Сварные соединения и сварные изделия в целом, выполненные контактной стыковой сваркой, могут содержать дефекты следующих видов.

Дефекты размеров и формы сварного изделия. Они включают отклонение размеров от номинальных значений, смещение и перекося (перелом) осей сваренных деталей (рис. 12.9).

Отклонение линейного размера сварного изделия от номинального значения обуславливается неточной установкой свариваемых деталей в электродных губках, отклонением припусков на оплавление и осадку, неправильной установкой ограничителей хода подвижной плиты машины с закрепленной деталью, люфтами в направляющих для перемещения подвижной плиты.

Смещение и перекося осей деталей вызываются износом электродных губок, люфтами в направляющих для перемещения подвижной плиты, большой установочной длиной.

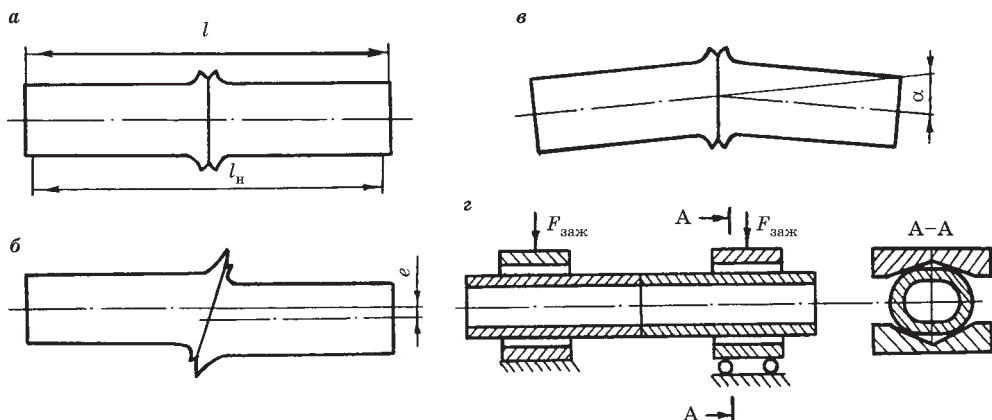


Рис. 12.9

Дефекты размеров и форма сварного изделия:

a — отклонение реального размера l от номинального l_n ; *б* — смещение осей деталей на величину e ; *в* — перекос осей деталей на угол α ; *г* — овальность при сварке труб из-за большой силы зажатия.

Для устранения данных дефектов необходимо выполнить наладку указанных узлов и механизмов контактной машины и оптимально подобрать установочную длину и припуски на оплавление и осадку.

Овальность в области сварного стыка при сварке труб может образоваться из-за деформации трубных заготовок при их зажатии в электродных губках большой силой (рис. 12.9г). Для устранения данного дефекта необходимо использовать губки с вырезами по диаметру трубы (рис. 10.1) и правильно подобрать силу зажатия трубных заготовок, чтобы они не деформировались и при этом удерживались силами трения от проскальзывания в электродных губках при осадке.

Дефект в виде пригара (подгара) поверхностей деталей. Он образуется в местах зажатия деталей в электродных губках из-за износа и загрязнения последних, их малой рабочей поверхности, малой силы зажатия свариваемых деталей. Все перечисленные факторы обуславливают повышенное контактное сопротивление электрод — деталь, что приводит к большому выделению тепла, к нагреву и окислению поверхности деталей. Для устранения пригара необходимо либо восстановить форму и размеры рабочих поверхностей губок, очистив их от оксидов и прочих загрязнений, либо увеличить силу зажатия деталей при исправленных электродных губках.

Дефекты в виде макронесплошностей. Они включают в себя горячие трещины, разрывы, расслоения, раковины и рыхлоты.

Горячие трещины и разрывы образуются, когда сварное изделие сразу после сварки подвергается изгибу или растяжению. При этом сварной стык, имея высокую температуру, может получать локальные разрушения под действием растягивающих напряжений. Такие напряжения могут образоваться при извлечении из электродов машины и последующей транспортировке тяжелого сварного изделия (например, рельсовой плети).

Для устранения горячих трещин и разрывов стык тяжелого изделия необходимо после сварки охладить до температуры, когда металл приобретет высокую прочность.

Расслоения образуются между волокнами проката (рис. 10.3в) в условиях высокой пластической деформации осадки, которая вызывает их сильное искривление. При чрезмерной осадке изгиб волокон сопровождается разрушением находящихся между ними цепочек из неметаллических включений, вследствие чего и образуются расслоения. Для устранения расслоений осадку необходимо выполнять в пределах оптимального припуска.

Раковины и рыхлоты образуются в объеме закристаллизовавшегося металла, который при осадке был захлопнут в глубоких кратерах и остался не выдвинутым из стыка. Для уменьшения глубины кратеров необходимо снижать в пределах допустимого скорость оплавления, а для выдавливания из стыка всего жидкого металла следует увеличить припуск на осадку.

Дефекты монолитной структуры. Они включают в себя непровары, слипания и матовые пятна. Все данные дефекты создаются оксидными пленками.

Непровары создаются оксидными пленками толщиной от 50 мкм до нескольких сотен микрометров. Непровары снижают прочность сварного соединения при статических и, особенно резко, при переменных нагрузках и являются недопустимыми дефектами.

Слипания образуют оксидные пленки толщиной 1...50 мкм. Они также существенно снижают прочность сварного соединения при переменных нагрузках и менее значительно — при постоянных.

Матовые пятна образуются оксидными пленками толщиной менее 1 мкм. Данные дефекты мало снижают прочность сварного соединения даже при отрицательных температурах, если они расположены в плоскости стыка разрозненно и в сумме занимают небольшую площадь.

Для устранения всех дефектов, вызванных оксидными пленками, необходимо ограничить окисление металла на стадии нагрева и обеспечить полное выдавливание оксидов при осадке.

Дефекты микроструктуры. К ним относятся образование светлой полосы в стыке при сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей, пережог металла, образование видманштеттовой структуры.

Светлая полоска, образующаяся в центре стыка при сварке низкоуглеродистых сталей, является следствием выгорания углерода на стадии нагрева, что приводит к образованию в указанной зоне однородного феррита, имеющего низкую травимось.

Светлая полоска снижает однородность механических свойств сварного соединения, но не относится к недопустимым дефектам. Длительная термическая обработка позволяет устранить неравномерное распределение углерода и светлую полосу.

Пережогом металла является окисление границ зерен при нагреве, близком к температуре солидуса. Пережог вызывает резкое снижение прочности соединения и является недопустимым и неустраняемым дефектом.

Видманштеттова структура, которая может образоваться в стыке из низко- и среднеуглеродистых сталей, характеризуется тем, что избыток

феррита выделяется в остывающей стали не в виде сетки по границам зерен аустенита, а внутри их параллельными пластинками. Данная структура имеет грубое строение, что снижает пластичность сварного соединения. Устраняется видманштеттова структура нормализацией или отжигом.

Допустимость или недопустимость данного дефекта структуры определяется с уровнем требования к качеству сварного соединения.

12.7. СХЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТЫКОВОЙ СВАРКИ

Прежде, чем приступать к разработке технологического процесса изготовления изделия с применением стыковой сварки, необходимо рассмотреть принципиальную возможность ее применения с учетом материала, размеров и формы свариваемой детали, как это показано в пункте 12.2.

Далее необходимо проанализировать металлургические и прочие трудности сварки материала деталей, чтобы обоснованно выбрать тип режима сварки, его основные параметры и технику сварки. Изготовление сварного изделия включает несколько типов технологических операций.

Подготовительные операции. *Обработка концевых частей деталей* в той или иной степени всегда необходима перед стыковой сваркой. Характер данной обработки зависит от способа сварки, а также размеров и формы поперечных сечений деталей, и он рассмотрен в пункте 12.2 и на рисунке 12.2.

Очистка боковых поверхностей деталей в местах их зажатия в электродах контактной машины требуется при условии их загрязненности ржавчиной, окалиной и т. д., что изложено в пункте 12.2. При сварке труб методом сопротивления необходимо зачищать внутреннюю и наружную поверхности трубы на расстоянии не менее 20 мм от торца.

Выбор материала электродов. Рабочие поверхности электродов стыковых машин, контактирующие с поверхностями деталей, подвергаются напряжениям смятия от сил зажатия деталей в электродах и абразивному износу в случае проскальзывания деталей в электродных губках. Для снижения износа электроды необходимо делать из материала с повышенной твердостью и необходимой электропроводностью. Такими электродными материалами являются сплавы меди с легирующими элементами (Ni, Ti, Be, Si, Co, Cr и т. д.), которые называются бронзами. Для электродов стыковых машин используют бронзы с твердостью HV = 140...240. Данной твердости соответствуют бронзы никель-бериллийтитановая БрНБТ, никельхромкремнистая БрНХК, кремнийхромокобальтовая БрКХКо и др.

Проверка формы и состояния поверхностей электродов, т. е. их износа, а также их соосности выполняется перед сваркой для предупреждения образования дефектов в сварных соединениях, рассмотренных в пункте 12.6 и на рисунке 12.9.

Сварочная операция. Выбор разновидности стыковой сварки (сопротивлением или оплавлением, с интенсификацией нагрева или без) в совокупности с материалом, формой и размерами поперечных сечений деталей определяют все факторы, необходимые для выполнения сварки.

Циклограмму процесса сварки выбирают в зависимости от разновидности стыковой сварки с учетом характера осадки (без срезания или со срезанием гра-та) и термообработки (без термообработки в машине или с термообработкой). Типовые циклограммы рассмотрены в пунктах 12.3 и 12.4, а также на рисун-ках 12.3, 12.4 и 12.7.

Параметры режима сварки выбирают по рекомендациям пунктов 12.3 и 12.4 или другой литературы. Выбранные параметры необходимо проверить путем сварки образцов и контроля их качества. При необходимости параметры режима необходимо скорректировать для получения нужного качества сварно-го соединения.

Техника сварки, кроме выполнения принятой циклограммы, может вклю-чать организацию внешней защиты зоны сварки от воздуха, очередность вы-полнения сварных соединений в составе изделия и т. д.

Послесварочные операции. *Удаление гра-та*, если это невозможно сделать в процессе осадки, выполняется специальным методом, как это, например, по-казано на рисунке 12.6 применительно к сварной трубе.

Термообработка сварного соединения вне контактной машины выполняется с помощью различных нагревателей (в печах, токами высокой частоты и т. д.).

Контроль качества сварных соединений выполняется в соответствии с ин-струкцией, действующей на предприятии.

Исправление дефектов сварных соединений выполняется также в соответ-ствии с инструкцией на контроль качества. Сюда можно, например, отнести ис-правление формы сварных соединений путем правки, исправление результатов термообработки и т. д.

12.8. КОНТАКТНАЯ СТЫКОВАЯ СВАРКА ОСНОВНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

12.8.1. СВАРКА УГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Углеродистые стали. Они хорошо свариваются в широком диапазоне режимов как сопротивлением, так и оплавлением. Для их сварки используют рекомендованные ранее параметры режима, которые могут кор-ректироваться в соответствии с особыми свойствами стали, с типом и сечением сортамента, из которого изготавливается сварное изделие.

Низкоуглеродистые стали (среднее содержание углерода до 0,25%) имеют ряд свойств, которые облегчают процесс сварки и обеспечивают требуемое ка-чество сварных соединений:

- их удельное электрическое сопротивление имеет бóльшую величину в сопо-ставлении с алюминием, медью, и их сплавами, вследствие чего сварочный ток имеет меньшее значение;
- сопротивление пластической деформации данных сталей умеренное, что облегчает проведение осадки;
- малая чувствительность к закалке практически исключает охрупчивание сварного соединения из данных сталей;
- узкий интервал кристаллизации снижает их склонность к горячим трещи-нам;

- отсутствие в данных сталях больших количеств элементов Si, Mn, Cr, Al и т. д., дающих тугоплавкие оксиды, прочно сцепленные с основным металлом, облегчает осадку, т. к. в ходе ее выдавливаются в грат более легко удаляемые оксиды железа.

С другой стороны, из-за низкого содержания углерода сужается область оптимальных режимов при сварке оплавлением и ухудшается защита от окисления стали вследствие малого выделения газа — восстановителя CO. Выгорание углерода при оплавлении приводит к образованию в стыке данных сталей нетравящейся (белой) на макрошлифе полосы, состоящей из одного феррита, которая имеет пониженную твердость и этим усиливает неоднородность механических свойств соединения.

Предварительный подогрев для данных сталей возможен при сварке деталей с повышенным сечением. Из-за низкого содержания углерода скорости оплавления и осадки необходимо выбирать по верхним пределам, чтобы уменьшить окисление стали.

Среднеуглеродистые стали с содержанием углерода 0,26...0,45% склонны к закалке, что вызывает охрупчивание сварного соединения. Для устранения закалки необходимо уменьшить скорость охлаждения данных сталей после сварки, что достигается предварительным подогревом в контактной машине (см. п. 12.5).

Несколько большее содержание углерода в данных сталях тормозит окислительные процессы при оплавлении, что позволяет их сваривать с меньшими скоростями оплавления и осадки по сравнению с низкоуглеродистыми сталями.

Высокоуглеродистые конструкционные стали с содержанием углерода 0,46...0,75% характеризуются высокой склонностью к закалке и после охлаждения имеют структуру мартенсита с остатками аустенита. Для снижения закалки данные стали необходимо сваривать либо с предварительным подогревом на мягком режиме, либо на жестком режиме с последующим отпуском после сварки. Высокоуглеродистые стали имеют широкий интервал кристаллизации. Это обуславливает образование глубоких кратеров на оплавляемых торцах при высоких скоростях оплавления. При осадке в глубоких кратерах захлопывается жидкий металл, в котором после кристаллизации образуются раковины и рыхлоты. Уменьшение глубины кратеров достигается оплавлением на пониженных скоростях 0,6...1,2 мм/с. Осадку данных сталей необходимо проводить с повышенным давлением 100...120 МПа, т. к. гарантированное выдавливание жидкого металла из стыка возможно только вместе с твердым. Глубину прогрева высокоуглеродистых сталей уменьшают сокращением длительности осадки под током для устранения расслоений в стыке в процессе осадки.

Низколегированные стали. При стыковой сварке низколегированных сталей проявляется ряд общих трудностей:

- образование на торцах деталей при нагреве тугоплавких и трудно выдавливаемых из стыка при осадке оксидов Al, Cr, Si, Mn;
- повышенное сопротивление пластической деформации, требующее увеличенного давления осадки;

- повышенная склонность к закалке, вызывающая охрупчивание сварного соединения.

Облегчающим фактором при сварке данных сталей является применение умеренных сварочных токов, т. к. данные стали имеют повышенное удельное электрическое сопротивление. Процесс сварки следует вести на рекомендованных ранее параметрах режима (п. 12.3 и 12.4), хотя по отношению к отдельным типам сталей некоторые параметры режима будут отклоняться в зависимости от их свойств.

Сложнолегированные перлитные стали марок 12ХМ, 20Х1М1Ф1ТР, 12Х1МФ и т. д. используют как теплоустойчивые, работающие при температурах до 500...580°C и давлении пара 80...100 даН/см². В структуре сталей содержатся карбиды ванадия, ниобия, молибдена, которые препятствуют росту зерна стали при нагреве. Элементы Cr, Mo, V повышают жаропрочность сталей.

В сварном соединении возможно повышение твердости на 20...50% из-за закалки, что может потребовать местной термообработки. В плоскости стыка наблюдается светлая обезуглероженная полоска металла, как и при сварке низкоуглеродистых сталей, удаляемая термообработкой. Наличие в сталях легкоокисляющихся элементов Mn, Cr, Si требует интенсивного оплавления на повышенных скоростях и увеличенных скоростей осадки 60...150 мм/с. Сварные соединения из сталей с содержанием хрома более 1,5% (15Х1М1Ф, 15Х2М2ФБС) требуют обязательного отпуска после сварки для повышения пластичности.

Марганцовистые стали с содержанием марганца не более 2,5% (09Г2, 14Г2, 18Г2 и т. д.) имеют повышенную ударную вязкость и низкий порог хладноломкости. При повышенном содержании марганца, близком к верхнему пределу, в стыке появляются участки с мартенситной и бейнитной структурой. Твердость в области стыка может повышаться на 10...15% по сравнению с основным материалом, а непосредственно в плоскости стыка снижается при содержании Mn < 1%. Для выравнивания пластичности сварного соединения с основным металлом применяют отпуск.

Углеродистые и низколегированные стали используются в большей степени по сравнению с другими материалами при изготовлении сварных конструкций с применением стыковой сварки.

Сварка сопротивлением таких сталей применяется ограниченно. Ее используют для сварки проволоки и прутков диаметром 5...15 мм. Сварку звеньев цепей из прутков диаметром 20 мм также выполняют сопротивлением. Используют стыковую сварку сопротивлением для соединения труб с поперечным сечением до 500 мм² (например, труб 32×5,5 мм из стали 15ХМ).

Наибольшее применение находит *стыковая сварка оплавлением*, имеющая ряд ранее отмеченных основных достоинств перед сваркой сопротивлением. Сварку оплавлением используют для соединения разных видов прокатных профилей: листов, полос, сортового проката (прутков, швеллеров, уголков и т. д.), труб. Полосы, уголки, швеллеры сваривают с толщиной стенки до 50 мм, прутки квадратного сечением 200×200 мм и круглые диаметром до 150 мм. Диаметры свариваемых труб из углеродистых и низколегированных сталей имеют диапазон от 32 до 1420 мм.

Применяют сварку оплавлением для изготовления деталей замкнутой формы: колец, рам, звеньев цепей. Сваривают кольца из углеродистых (Ст3) и низколегированных сталей (15ХМ, 09Г2С) диаметром 350...1000 мм с поперечным сечением 2000...14000 мм². Железнодорожные рельсы из высокоуглеродистой стали (содержание углерода до 0,9%) сечением 5000...8000 мм² сваривают стыковой сваркой с импульсным оплавлением или оплавлением с предварительным подогревом.

Таким образом, стыковая сварка позволяет соединять детали сечением от 2...3 мм² (проволока диаметром 1,5...2 мм) до 89 000 мм² (труба диаметром 1420×20 мм).

12.8.2. СВАРКА ЧУГУНА

Серый чугун как конструкционный материал имеет ряд достоинств. Он является более дешевым, чем углеродистая сталь, т. к. получается в ходе доменного процесса без последующего передела, что характерно для стали. Чугун обладает свойством гасить вибрацию, имеет более высокую, чем углеродистая сталь, коррозионную стойкость в атмосфере топочных газов и в почве.

Основные трудности *стыковой сварки чугуна* связаны с его низкой пластичностью и структурными изменениями при нагреве и охлаждении.

Низкая пластичность чугуна затрудняет проведение осадки при стыковой сварке. Чугун сваривают только стыковой сваркой оплавлением, получая при этом сварные соединения хорошего качества.

При стыковой сварке серого и высокопрочного чугунов возможно их отбеление, т. е. образование в стыке участков со структурой белого чугуна, состоящего из перлита и ледебурита, если охлаждение стыка происходит с высокой скоростью.

Важным условием получения качественного *сварного соединения* из чугуна является характер охлаждения деталей после осадки. Сварка непрерывным оплавлением без предварительного подогрева сопровождается недостаточным прогревом деталей, что приводит после осадки к высокой скорости их охлаждения и образованию в стыке закалочной структуры (мартенсита или мартенсита с остаточным аустенитом).

Из-за образования в стыке твердых структур стыковую сварку чугуна непрерывным оплавлением без предварительного подогрева не применяют. Сварка непрерывным оплавлением с *предварительным прерывистым подогревом* (рис. 12.7а) дает хорошее качество сварных соединений из серого, высокопрочного и ковкого чугунов. Подогрев должен быть таким, чтобы скорость охлаждения не превышала 6°С/с. Температура подогрева составляет 700...800°С. Оплавление при сварке чугуна должно быть интенсивным с нарастающей скоростью ($V_{\text{опл. кон}} = 2 \text{ мм/с}$). Начальные скорости оплавления при сварке деталей с повышенным поперечным сечением (тысячи мм²) составляют $V_{\text{опл. нач}} = 0,2...0,4 \text{ мм/с}$. Ввиду близких значений теплопроводностей чугуна и углеродистой стали припуски на их оплавление принимаются практически одинаковыми. Для серого чугуна припуск на осадку включает толщину расплавленных слоев на торцах деталей и твердые слои, нагретые выше 1000°С,

т. к. в них при осадке образуются трещины из-за потери чугуном пластичности при данных температурах. Величина припуска на осадку для серого чугуна составляет $\Delta_{oc} = 0,2 \cdot d$ для прутков диаметром $d \leq 30$ мм и $\Delta_{oc} = 0,25 \cdot s$ при сварке труб с толщиной стенки $s = 10 \dots 13$ мм. Точное дозирование припуска на осадку является важным условием при сварке серого чугуна. Давление осадки при сварке серого чугуна используется пониженное $p_{oc} = 30 \dots 50$ МПа, чтобы не вызвать образования в стыке трещин.

Помимо сварки непрерывным оплавлением с предварительным прерывистым подогревом, для чугуна используют сварку с *импульсным оплавлением* (рис. 12.8б, в, г) с частотой вибрации порядка 20 Гц. Импульсное оплавление создает более мягкий термический цикл с низкими скоростями охлаждения до $1,5^\circ\text{C}/\text{с}$.

Сварные соединения, полученные рассмотренными способами, имеют прочность и твердость на уровне основного металла.

Сварку чугуна используют для соединения *чугунных труб*, полученных литьем из серого и высокопрочного чугунов. После сварки грат удаляют в горячем состоянии механическим путем с помощью специальных вращающихся бил. Разработанные технологии позволяют сваривать чугунные трубы диаметром до 400×10 мм с площадью поперечного сечения $12\,250$ мм².

12.8.3. СВАРКА АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ

Аустенитные стали используются в основном как коррозионностойкие (08X18H10, 08X18H10T, 12X18H10T, 08X17H3M2T и др.) и жаропрочные (10X14H14B2M, 20X25H20C2, 10X15H35BT и др.).

Трудности стыковой сварки аустенитных сталей обусловлены их сложным химическим составом, особенностями структуры и механическими свойствами. Сварочный нагрев вызывает рост зерна аустенита, что снижает пластические свойства сварного соединения и ударную вязкость.

Аустенитные стали при температурах нагрева под осадку ($T > 800^\circ\text{C}$) имеют в 2...3 раза большее сопротивление пластической деформации, чем углеродистые стали. Для их пластичной деформации при осадке требуется во столько же раз большее давление.

Большую трудность для процесса сварки создают оксиды хрома, которые являются прочными, тугоплавкими и гарантированно выдавливаются из стыка только вместе с расплавленным металлом. Для поддержания на торцах деталей расплавленного слоя металла до начала осадки оплавление ведут с повышенной и нарастающей к концу оплавления скоростью. Интенсивное оплавление создает вокруг стыка защитную атмосферу, что снижает окисляемость металла.

Металлургические трудности сварки аустенитных сталей (потеря коррозионной стойкости, охрупчивание сварного соединения карбидами, образование горячих трещин) рассмотрены в пункте 5.3.

Положительное влияние на процесс стыковой сварки оказывают теплофизические свойства аустенитных сталей. Повышенное удельное сопротивление аустенитных сталей обуславливает применение пониженного сварного тока по сравнению с углеродистыми сталями. При сварке аустенитных сталей

облегчается получение расплавленного слоя металла на торцах деталей из-за их пониженной теплопроводности и несколько меньшей температуры плавления по сравнению с низко- и среднеуглеродистыми сталями.

Стыковая сварка сопротивлением. Для аустенитных сталей ее применяют ограниченно только для соединения проволоки диаметром до 6 мм. Основной сложностью является образование оксидов хрома, трудно выдавливаемых из стыка при осадке. Для снижения окисления нагрев необходимо вести локально и быстро за счет низкого давления нагрева $P_n = 2 \dots 3$ МПа. При осадке давление повышается в 3...5 раз до 5...15 МПа. Припуск на осадку задается в пределах $(0,6 \dots 1,0) \cdot d$, где d — диаметр проволоки. При этом осадка под током составляет 60...70% от общего припуска на осадку.

Стыковая сварка оплавлением. Ее применяют в 2-х разновидностях: непрерывным оплавлением и непрерывным оплавлением с предварительным подогревом.

Сварка непрерывным оплавлением труб или лент обеспечивает равномерный нагрев торцов деталей по периметру трубы и по ширине ленты. Она не вызывает перегрева металла и, следовательно, роста зерна аустенита. При этом сокращается зона термического влияния. Количество высаженного в грат металла при сварке непрерывным оплавлением меньше, чем при сварке с предварительным подогревом.

К недостаткам сварки непрерывным оплавлением относятся применение больших давлений осадки из-за повышенного сопротивления пластической деформации аустенитных сталей, а также увеличенные потери энергии и металла.

Сварка непрерывным оплавлением с предварительным подогревом облегчает проведение осадки при пониженном давлении. Предварительно подогретый металл обуславливает легкое возбуждение процесса оплавления и его осуществление при пониженном токе и пониженной удельной мощности (кВ А/мм^2). С другой стороны, подогрев обуславливает при сварке определенные трудности. Выполняется подогрев периодическими замыканиями и размыканиями торцов деталей, находящихся под вторичным напряжением (рис. 12.7а). При замыкании торцы деталей контактируют в отдельных зонах, по которым протекает ток подогрева. Неравномерное протекание тока подогрева по поперечному сечению детали в прилегающих к контакту деталь — деталь областях вызывает и неравномерный подогрев металла по сечению. Из-за низкой теплопроводности аустенитных сталей температура подогрева плохо выравнивается по сечению детали. Неравномерность подогрева по сечению детали (труба, полоса) нарушает равномерность оплавления торцов и последующее протекание осадки. Оптимальная температура подогрева для труб из аустенитной стали сечением 450...500 мм² (труба 32×5,5) составляет 800...900°C, и она увеличивается с ростом сечения. При повышенном подогреве пластическая деформация металла в области стыка при осадке может потерять локальность (рис. 10.2е), что не позволит вытеснить оксиды. От перегрева в стыке образуется крупнозернистая структура, и при температурах $T_{\text{под}} = 1300 \dots 1400^\circ\text{C}$ появляются сквозные трещины. Высокий подогрев может вызвать пережог металла.

Стыковую сварку оплавлением аустенитных сталей применяют в основном для труб и полос. Установочная длина при сварке аустенитных сталей принимается практически одинаковой как при сварке без подогрева, так и при сварке с подогревом в пределах $l_y = (3...7) \cdot s$, где s — толщина трубы или полосы. Припуск на оплавление при сварке без подогрева составляет $\Delta_{опл} = (3...5) \cdot s$, а при сварке с подогревом $\Delta_{опл} = (1...2,5) \cdot s$, т. е. подогрев сокращает припуск на оплавление.

Средняя скорость оплавления при сварке без подогрева и с подогревом составляет соответственно $V_{опл. ср} = 1,5...3$ мм/с и $V_{опл. ср} = 2...4$ мм/с. При сварке без подогрева начальные скорости оплавления имеют малую величину (доли мм/с). Конечные скорости оплавления в обоих случаях должны быть не менее 8...10 мм/с.

Припуски на осадку при сварке без подогрева и с подогревом соответственно равны $\Delta_{ос} = (1...2) \cdot s$ и $\Delta_{ос} = (0,8...1,5) \cdot s$. В большей степени отличаются припуски на осадку под током: без подогрева $\Delta_{ос п/т} = (0,6...0,8) \cdot \Delta_{ос}$, а с подогревом — $\Delta_{ос п/т} = (0,4...0,5) \cdot \Delta_{ос}$. При сварке без подогрева более длительное протекание тока осадки необходимо для прогрева деталей вглубину и облегчения этим осадки.

Скорость осадки при сварке без подогрева и с подогревом соответственно равна $V_{ос} > 80$ мм/с и $V_{ос} = 30...45$ мм/с.

Давление осадки при сварке аустенитных сталей без подогрева характеризуется большой величиной $p_{ос} = 150...250$ МПа из-за их повышенного сопротивления пластичной деформации. Подогрев расширяет зону нагрева металла в области стыка и снижает этим давление осадки до величины $p_{ос} = 100...150$ МПа.

Плотность тока оплавления при сварке полос из аустенитной стали без подогрева составляет $j_{опл} = 15...20$ А/мм², а с подогревом в 1,5...2 раза меньше.

Послесварочная термообработка сварных соединений из аустенитных сталей обуславливается неоднородностью получаемой структуры. Кроме аустенита, в структуре сварного соединения содержатся трудно растворимые карбиды (TiC, NbC), выделения феррита и деформированные в процессе осадки зерна металла. Такая структурно-механическая неоднородность снижает пластичность и ударную вязкость сварного соединения.

Однородность структуры сварного соединения достигается термической обработкой в виде нагрева до 1050...1100°C с небольшой выдержкой для растворения карбидов и охлаждения на воздухе. Данную термообработку выполняют в контактной машине путем нагрева стыка током до указанных температур с выдержкой 1...2 минуты. После термообработки структура и ударная вязкость сварного соединения мало отличаются от основного металла.

Удаление внутреннего грата из сварных аустенитных труб производится только дорном из быстрорежущей стали (рис. 12.6а) сразу после сварки, когда грат находится в горячем состоянии.

Стыковая сварка оплавлением позволяет сваривать из аустенитных сталей трубы сечением до 500 мм², полосы сечением до 9000 мм² и профильные кольца сечением до 3215 мм².

12.8.4. СВАРКА АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ

Высокое сродство алюминия к кислороду определяет его сильную окисляемость. Оксиды алюминия имеют высокую термостойкость (их $T_{пл} = 2050^\circ\text{C}$) и при нагреве вплоть до расплавления алюминия остаются в твердом состоянии на поверхности расплава, что затрудняет их выдавливание из стыка при осадке. Повышенная теплопроводность алюминия и его сплавов затрудняет образование и поддержание на торцах деталей сплошного расплавленного слоя металла при стыковой сварке оплавлением. По этой причине имеет место высокая вероятность образования перед осадкой на торцах деталей отдельных очагов закристаллизовавшегося и покрытого оксидами металла, что также затрудняет выдавливание из стыка оксидов при осадке.

Для снижения окисляемости сварку сопротивлением алюминия и его сплавов ведут с минимальным временем нагрева, а при сварке оплавлением используют высокие скорости оплавления, достигающие до 20 мм/с перед осадкой.

Осадку выполняют с высокой скоростью (до 150...250 мм/с), что также снижает окисление и преждевременную кристаллизацию металла после прекращения оплавления во время захлопывания зазора в начальный момент осадки.

Низкое удельное сопротивление алюминия и его сплавов требует применения больших сварочных токов. Необходимые для стыковой сварки значения плотности тока находятся в широких пределах от 4...6 А/мм² до 20...50 А/мм² при сварке оплавлением и до сотен А/мм² при сварке сопротивлением.

Деформируемые алюминиевые сплавы делятся на термически неупрочняемые и термически упрочняемые (пункт 6.1). Упрочненные перед сваркой сплавы под действием сварочного нагрева могут разупрочняться, что составляет трудность их сварки. Поэтому сварку термически упрочненных сплавов выполняют на жестких режимах, чтобы сократить время пребывания сплава при разупрочняющих температурах нагрева выше 300°C до 20...30 с. Жесткий режим позволяет получить локальную по форме и требуемую по ширине и температуре нагрева область металла в стыке перед осадкой (рис. 10.1б) и уменьшить потери тепла в электроды.

Некоторое облегчение при стыковой сварке создает пониженная температура плавления алюминия ($T_{пл} = 660^\circ\text{C}$) и его сплавов ($T_{пл} = 500...650^\circ\text{C}$), а также их низкий интервал температур пластической деформации 350...500°C.

Стыковая сварка сопротивлением. Ее применяют для соединения проволоки, прутков, а также прессованных профилей, например, из сплава Д16 в виде уголков, швеллеров, тавров с поперечным сечением до 600 мм².

Сварку прутков методом сопротивления из сплавов АМгб и Д16 диаметром 8...13 мм выполняют при интенсивном и концентрированном нагреве области стыка. Для этого нагрев ведут при низком давлении $p_n = 7...15$ МПа с плотностью тока $j_{св} = 60...100$ А/мм². Осадку выполняют со срезанием графа (рис. 12.5б). Общий припуск на осадку задается в пределах $\Delta_{ос} = (1...1,5) \cdot d$, в котором осадка под током составляет 15...30% в зависимости от типа сплава. Давление осадки составляет величину $p_{ос} = 200...900$ МПа.

При сварке прессованных профилей установочную длину в зависимости от толщины s полки или стенки профиля принимают минимальной в пределах $l_y = (1,8...2,2) \cdot s$, чтобы снизить ширину зоны разупрочнения

сплава Д16. Сварку ведут на жестком режиме при величине давления нагрева $p_n = 30 \dots 80$ МПа, что обуславливает локальный и быстрый нагрев металла в области стыка при использовании плотности тока в пределах $j_{св} = 90 \dots 110$ А/мм². Припуск на осадку устанавливают в пределах $\Delta_{ос} = (1,8 \dots 2,5) \cdot s$, при этом осадка под током составляет $\Delta_{ос\text{ п/т}} = (0,9 \dots 1,2) \cdot s$. Давление осадки является повышенным $p_{ос} = 300 \dots 1000$ МПа, для срезания грата.

Сварка непрерывным оплавлением без предварительного подогрева. Данный способ применяют для соединения деталей сечением до 500...600 мм². Сортамент свариваемых деталей включает прутки из алюминия диаметром до 30 мм, полосы, уголки, швеллеры, и т. д. из сплавов АК6, Д16, АМг6Т сечением до 600 мм² и с толщиной стенки 4...7 мм.

Для сварки прутков диаметром d рекомендуются следующие параметры режима: $l_y = (1,5 \dots 2) \cdot d$; $\Delta_{опл} = (0,7 \dots 1) \cdot d$; $V_{опл.ср} = 6 \dots 11$ мм/с; $\Delta_{ос} = (0,5 \dots 0,7) \cdot d$; $V_{ос} = 150 \dots 250$ мм/с; $p_{ос} = 120 \dots 200$ МПа без срезания грата. Сварку полос и профилей с толщиной стенки s из указанных сплавов следует выполнять на параметрах режима: $l_y = (2 \dots 3) \cdot s$; $\Delta_{опл} = (1 \dots 3) \cdot s$; $V_{опл.ср} = 3 \dots 7$ мм/с; $\Delta_{ос} = (1,2 \dots 3) \cdot s$; $V_{ос} = 100 \dots 250$ мм/с; $p_{ос} = 180 \dots 220$ МПа без срезания грата.

Сварку непрерывным оплавлением без предварительного подогрева выполняют на повышенных плотностях тока, достигающих перед осадкой 25...45 А/мм², чтобы уменьшить время нагрева легких сплавов и сократить длительность их пребывания в области температур разупрочнения. Сварные соединения имеют механические свойства, близкие к основному металлу из-за отсутствия их разупрочнения.

Сварка непрерывным оплавлением с программированием параметров режима и предварительным подогревом. Она позволяет сваривать детали с поперечным сечением до 60 000...70 000 мм².

Торцы деталей предварительно оплавляют для выравнивания их поверхностей. После оплавления их сжимают небольшим давлением 30...50 МПа и подогревают током небольшой плотности 3...6 А/мм² при пониженном вторичном напряжении до температур 150...200°С. После подогрева детали размыкают и начинают их оплавление при номинальном вторичном напряжении с возрастающей скоростью. Скорость оплавления после подогрева возрастает от небольших начальных значений 0,5...1 мм/с до высоких конечных значений перед осадкой (20 мм/с). Высокая конечная скорость оплавления необходима, чтобы обновить расплавленный металл на торцах, уменьшить этим его окисление и выровнять поверхности торцов. Припуск на оплавление принимается в пределах $(0,7 \dots 2) \cdot s$, где s — толщина профиля, а на осадку — $(0,7 \dots 1,2) \cdot s$. Осадку выполняется со скоростью не менее 200 мм/с при давлении в пределах 150...250 МПа.

Сварные соединения из термически не упрочняемых сплавов (АМг6) получают незначительное разупрочнение 4...6% по отношению к основному металлу. В большей степени снижается прочность толстостенных (60 мм и более) сварных соединений из термически упрочненных сплавов. Их последующая термообработка (закалка и старение) восстанавливает прочность до уровня (0,95...0,98) от основного металла.

Снижение прочности сварных соединений из легких сплавов происходит также вследствие значительного искривления волокон и расслоений по

ним (рис. 10.3в) при осадке, чему способствует повышенный припуск на осадку. Меньшее искривление волокон обеспечивает осадка со срезанием грата, но для этого требуются большие давления осадки.

Сварка импульсным оплавлением легких сплавов. Способ также позволяет интенсифицировать процесс нагрева деталей перед осадкой (рис. 12.8б, в, г). Данный метод применяют для сварки толстостенных деталей сечением до $10\,000\text{ мм}^2$.

Импульсное оплавление при плотности тока $4\ldots 5\text{ А/мм}^2$ позволяет получить температуру нагрева металла в области стыка на $100\ldots 150^\circ\text{C}$ выше, чем при непрерывном оплавлении, за сравнительно короткий промежуток времени (до 30 с), предотвращая этим разупрочнение сплавов. Повышение плотности тока до $6\ldots 7\text{ А/мм}^2$ сокращает длительность нагрева до 20 с. При импульсном оплавлении легких сплавов наибольший прирост температуры в области стыка достигается при частоте колебания $25\ldots 35\text{ Гц}$ и амплитуде 0,3 мм. Импульсное оплавление увеличивает толщину жидкого слоя металла на торцах деталей, что облегчает выдавливание оксидов из стыка при осадке и формирование качественного сварного соединения. Сварка импульсным оплавлением, как и оплавлением с предварительным подогревом, выполняется с нарастающей скоростью оплавления до $15\ldots 25\text{ мм/с}$ перед осадкой, с такими же припусками на оплавление и осадку и с такими же значениями скорости и давления осадки. Кратковременный нагрев $20\ldots 40\text{ с}$ не приводит к существенному разупрочнению сварного соединения при сварке термически упрочненных легких сплавов, обеспечивая этим прочность сварного соединения на уровне основного металла.

Применение стыковой сварки легких сплавов методом оплавления. Способ используют для сварки деталей с повышенным поперечным сечением: кольцевых заготовок из прессованных профилей сечением до $60\,000\text{ мм}^2$, продольных швов обечаек длиной до 2000 мм, толщиной до 35 мм и общей площадью поперечного сечения до $70\,000\text{ мм}^2$; различных гнутых профилей с толщиной стенки до 100 мм и общим поперечным сечением до $40\,000\text{ мм}^2$.

12.8.5. СВАРКА ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ

Общая характеристика титана и его сплавов (полиморфизм, структуры, способы упрочнения и трудности сварки) рассмотрены в пункте 6.1.

Факторами, облегчающими процесс сварки и получение качественного сварного соединения, являются: низкая теплопроводность, уменьшающая потери тепла из зоны нагрева; высокое удельное сопротивление, что вместе с низкой теплопроводностью снижают величину сварочного тока; пониженный коэффициент линейного расширения, вследствие чего уменьшаются остаточные сварочные напряжения в стыке; высокая стойкость к горячим трещинам.

Стыковая сварка сопротивлением. Титан и его сплавы можно сваривать данным методом при условии внешней защиты зоны стыка аргоном или гелием. Титан, как и алюминий, требует высокоскоростного нагрева при повышенных плотностях тока (десятки и сотни А/мм^2) и малом времени нагрева (десятые доли секунды). Скорость осадки, как и при сварке алюминия, должна быть не менее 250 мм/с . В сварных соединениях наблюдается крупнозернистая

структура, являющаяся следствием перегрева металла и имеющая пониженную пластичность. Сварка сопротивлением применяется для деталей с ограниченным поперечным сечением.

Стыковая сварка оплавлением. Она является основным способом для титана и его сплавов, позволяющая получить требуемое качество сварных соединений.

Выполняют сварку как в аргоне, так и на воздухе. Параметры режима сварки титана и его сплавов во многом соответствуют параметрам, установленным для стали. Отличием является припуск на оплавление, который при сварке титана принимается повышенным, что в условиях низкой теплопроводности титана позволяет получить требуемый прогрев деталей вглубину. Средние скорости оплавления составляют величину $V_{\text{опл. ср}} = 1...2,5$ мм/с. Перед осадкой оплавление выполняется на повышенной скорости $V_{\text{опл. кон}} = 4...8$ мм/с, что снижает его окисление. Плотность тока оплавления при сварке без подогрева составляет $j_{\text{опл}} = 10...13$ А/мм². При осадке пластическая деформация распространяется на металл, нагретый выше 1200...1300°C. Это локализует осадку и позволяет в целом снизить припуск на осадку. Осадка выполняется на повышенной скорости $V_{\text{ос}}$ до 200 мм/с, что устраняет окисление титана при захлопывании зазора между торцами в момент перехода от оплавления к осадке. Давление осадки при сварке без подогрева составляет величину $p_{\text{ос}} = 50...100$ МПа.

При сварке на воздухе высока вероятность образования светлой полосы в центре стыка из окисленного α -титана, которая, имея повышенную твердость $HV = 500...550$, охрупчивает сварное соединение. Светлую полосу можно практически выдавить при осадке за счет несколько увеличенного припуска на осадку. Сварка в аргоне препятствует окислению титана и исключает образование в стыке упрочненной светлой полосы.

Сварку деталей с повышенным поперечным сечением (1000 и более мм²) выполняют с предварительным подогревом до 1000...1200°C. Подогрев снижает плотность тока оплавления до 4...6 А/мм² и давление осадки до 20...50 МПа.

Применение *импульсного оплавления* позволяет получить высокое качество сварных соединений без внешней защиты на воздухе. При этом достигается более высокая температура нагрева металла по сравнению с непрерывным оплавлением и в несколько раз сокращается длительность нагрева (до 3 раз). Повышенная температура металла на поверхностях торцов и относительно узкая зона нагрева, обусловленные низкой теплопроводностью титана, обеспечивают локальную деформацию и полное удаление оксидов из стыка. При этом не происходит существенного ухудшения структуры. Импульсное оплавление выполняется на частотах $f = 5...6$ Гц при амплитудах колебания $A = 0,4...0,8$ мм.

Используют сварку оплавлением для изготовления колец из титана и его сплавов сечением от 150 до 10 000 мм². При изготовлении возможны следующие варианты последовательности операций сварки и термообработки: закалка — старение — сварка — отжиг; закалка — сварка — старение. В первом случае используют местный отжиг области стыка, т. к. сам материал перед сваркой был состарен. Отжиг преобразует нестабильную и упрочненную α -фазу в стабильную $\alpha + \beta$ -структуру с твердостью на уровне основного металла. Температура отжига составляет 650...900°C. Во втором случае старение выполняется для всего изделия, а в области стыка старение при этом выполняет функцию отжига.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Достоинства и недостатки стыковой сварки сопротивлением и оплавлением.
2. Какие факторы необходимо учитывать при выборе стыковой сварки для изготовления сварной конструкции?
3. Общие требования подготовки деталей под стыковую сварку сопротивлением и оплавлением.
4. Дополнительные требования подготовки деталей под стыковую сварку сопротивлением.
5. Циклограммы стыковой сварки сопротивлением.
6. Типы режимов стыковой сварки.
7. Параметры режимов стыковой сварки сопротивлением и их влияние на качество соединения.
8. Определение оптимальных параметров режимов сварки стыкового соединения из заданного материала.
9. Циклограмма стыковой сварки непрерывным оплавлением.
10. Параметры режима стыковой сварки оплавлением и их влияние на качество соединения.
11. Какие операции могут потребоваться после выполнения стыковой сварки?
12. Каковы цели и методы интенсификации нагрева деталей при стыковой сварке оплавлением?
13. Сварка непрерывным оплавлением с предварительным подогревом: циклограмма, техника выполнения, достоинства, недостатки.
14. Сварка непрерывным оплавлением с программированием параметров режима: циклограмма, техника выполнения, достоинства, недостатки.
15. Сварка импульсным оплавлением: циклограмма, техника выполнения, достоинства, недостатки.
16. Каковы основные типы дефектов, образующихся в стыковых соединениях?
17. Дайте оценку свариваемости низко-, средне- и высокоуглеродистых сталей при стыковой сварке.
18. Каковы основные трудности стыковой сварки низколегированных сталей и способы их устранения?
19. Каковы основные трудности стыковой сварки чугуна и способы их устранения?
20. Каковы основные трудности стыковой сварки аустенитных сталей?
21. Разновидности стыковой сварки аустенитных сталей и их достоинства и недостатки.
22. Каковы основные трудности стыковой сварки алюминия и его сплавов?
23. Разновидности стыковой сварки алюминия и его сплавов.
24. Каковы основные трудности стыковой сварки титана и его сплавов?
25. Разновидности стыковой сварки титана и его сплавов.

ГЛАВА 13 ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

13.1. СОСТАВ, ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ КОНТАКТНЫХ МАШИН

Выбранное или спроектированное оборудование для сварки заданного узла должно обеспечивать выполнение поставленной технологической задачи наиболее экономичным путем при безопасной его работе с учетом требований организации производства, экологии и эргономики.

Контактная сварка — термомеханический процесс. В соответствии с этим определением, оборудование для осуществления контактной сварки, структурная схема которого представлена на рисунке 13.1а, состоит из двух взаимосвязанных частей:

- *электрической*, обеспечивающей нагрев зоны соединения проходящим по свариваемым деталям током;
- *механической*, выполняющей сжатие свариваемых деталей, подвод к ним сварочного тока, перемещение деталей во время сварки и необходимую пластическую деформацию металла в зоне соединения.

Электрическая часть контактной машины состоит из ряда функциональных блоков:

- *внешнего контура* — совокупности токоведущих элементов машины (гибкие и жесткие шины, консоли или хоботы, колодки, угольники, электрододержатели, электроды и т. д.) и контактов между ними, передающих сварочный ток от источника питания (выводных колодок сварочного трансформатора) к свариваемым деталям. Часть элементов внешнего контура участвует в сжатии и перемещении свариваемых деталей, т. е. передает механическую нагрузку. Различают также *вторичный контур* контактной машины, включающий в себя внешний контур и вторичную обмотку сварочного трансформатора (в машинах постоянного тока — выпрямительный диодный блок) и *сварочную цепь*, состоящую из вторичного контура и свариваемых деталей;
- *источника питания* (источника сварочного тока), преобразующего энергию электрической сети в сварочный ток необходимой величины, формы и длительности;
- *контактора* — управляемого устройства, коммутирующего ток в первичной цепи контактной машины и участвующего в формировании величины, формы и длительности сварочного тока, а также являющегося силовым

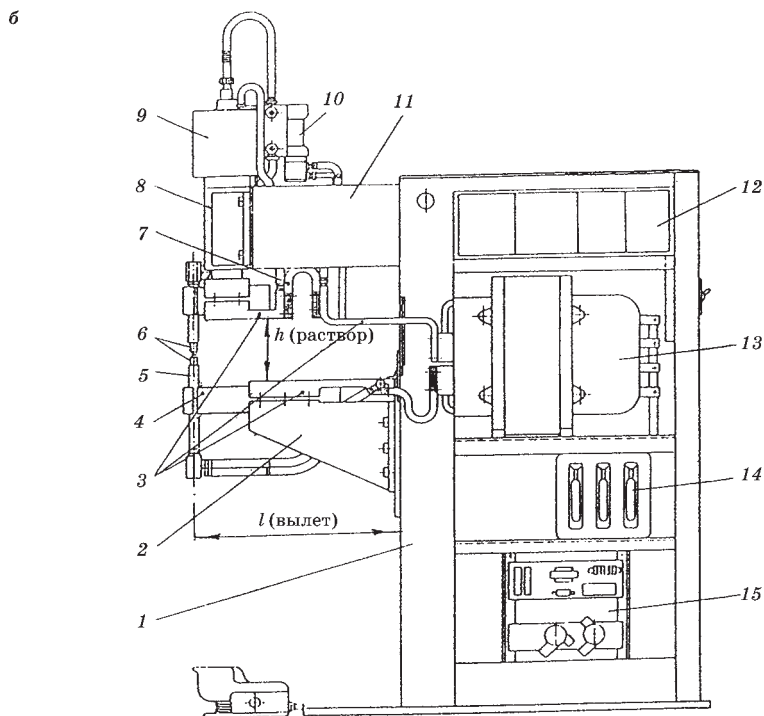
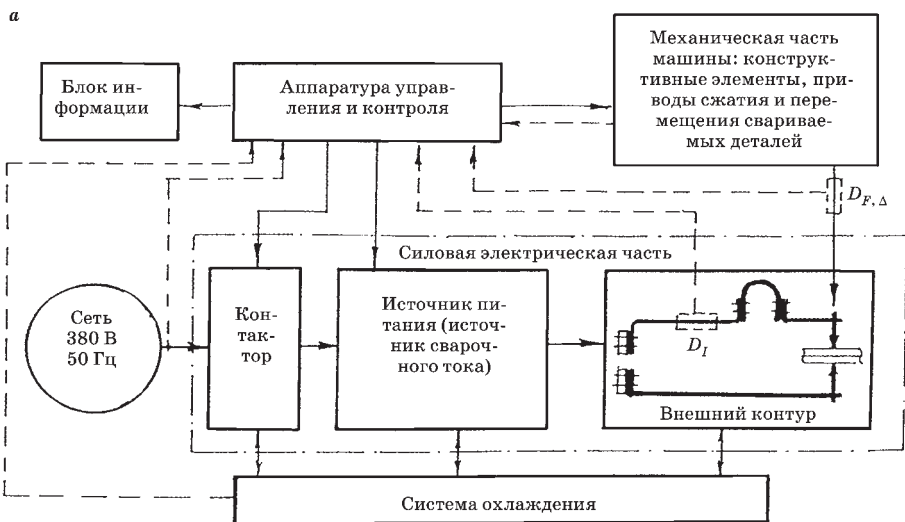


Рис. 13.1
Структурная схема (а) и компоновка узлов типовой контактной машины для точечной сварки (б):

1 — корпус; 2 — нижний кронштейн; 3 — жесткие токоведущие шины внешнего контура; 4 — токоведущая консоль (хобот); 5 — электрододержатель; 6 — электроды; 7 — гибкие шины; 8 — направляющее устройство; 9 — пневмоцилиндр; 10 — пневмоаппаратура; 11 — верхний кронштейн корпуса; 12 — аппаратура управления и контроля; 13 — сварочный трансформатор; 14 — переключатель ступеней; 15 — тиристорный контактор.

исполнительным элементом при организации системы автоматического управления процессом контактной сварки;

- *аппаратуры управления и контроля*, обеспечивающей заданную последовательность и продолжительность всех операций цикла сварки, установку и стабилизацию параметров процесса, их контроль, управление и регистрацию.

Механическая часть контактной машины включает в себя *комплекс конструктивных элементов* (корпус, станину, кронштейны, консоли, упоры, электрододержатели, подвесные устройства и т. д.), обеспечивающих жесткость, маневренность, эксплуатационную надежность контактной машины, и *механизмы*, обеспечивающие закрепление, сжатие и перемещение свариваемых деталей. Некоторые конструктивные элементы и узлы механизмов проводят сварочный ток. На рисунке 13.1б представлена компоновка узлов типовой точечной машины переменного тока.

Основные требования к машинам контактной сварки общего назначения определяет ГОСТ 297-80 «Машины контактные. Общие технические условия». Прежде всего ГОСТ оговаривает *основные параметры контактных машин*:

- *наибольший вторичный ток ($I_{2\max}$)* — ток, который протекает во вторичном контуре при его коротком замыкании на максимальной ступени регулирования трансформатора, при минимальном угле включения тириستоров контактора, при наименьших вылете и растворе внешнего контура;
- *номинальный длительный вторичный ток ($I_{2\text{ном. дл}}$)* — условный, расчетный для машины ток, который при непрерывном протекании по вторичному контуру нагревает его элементы до той же температуры, что и реальный сварочный ток в повторно-кратковременном режиме;
- *номинальные и (или) наименьшие и наибольшие величины силы сжатия ($F_{\text{сж}}$), вылета (l), раствора (h), вертикального и взаимного горизонтального смещения электродов (ΔS), наибольшая длительность прохождения сварочного тока ($t_{\text{св. max}}$)* — для точечных, шовных и рельефных машин.
- *линейная скорость роликовых электродов* — для шовных машин;
- *сила осадки и расстояние между токоведущими губками (электродами)* — для стыковых машин.

Все многообразие типов контактных машин целесообразно разделить на две большие группы: машины общего назначения и специальные.

Контактные машины общего назначения выпускаются в соответствии с ГОСТ 297-80, который устанавливает их следующую классификацию:

- по виду получаемого соединения — точечные, шовные, рельефные, стыковые;
- по конструктивному исполнению — стационарные, прессового и радиального типа, подвесные со встроенным и отдельным трансформатором;
- по типу источника сварочного тока — переменного тока промышленной частоты, низкочастотные, постоянного тока, конденсаторные, переменного тока повышенной частоты (800...2000 Гц);
- по типу силы сжатия — с постоянной и переменной силой;
- по нормируемым техническим требованиям — группа А (с повышенной стабильностью параметров) и группа Б (с нормальной стабильностью параметров).

Контактные машины специального назначения предназначены для сварки конкретных узлов: звеньев цепи, дверей автомобилей, бензобаков, арматурных сеток, корпусов полупроводниковых приборов и т. п. В специализированных контактных машинах может осуществляться формообразование свариваемых деталей, их транспортировка и фиксация, снятие грата и др. сопутствующие технологические операции. Сложность специализированных машин значительно выше машин общего назначения, но за счет высокой производительности в условиях крупносерийного и массового производства они экономичнее универсальных машин при эксплуатации и их доля в производстве контактных машин постоянно повышается.

13.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, НАГРУЗОЧНЫЕ И ВНЕШНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, РЕЖИМ РАБОТЫ КОНТАКТНЫХ МАШИН

Энергетические параметры контактных машин. Нагрев зоны соединения при термомеханическом процессе контактной сварки осуществляется электрическим током, протекающим по свариваемым деталям. Величина и форма импульса сварочного тока формируется электрической частью контактной машины, которая должна обеспечить преобразование электрической энергии, забираемой из сети в тепловую энергию, в зоне соединения наиболее экономичным путем.

Принципиальная силовая электрическая схема контактной машины переменного тока промышленной частоты, схема ее замещения, приведенная ко вторичной цепи, а также соответствующий ей треугольник сопротивления, представлены на рисунке 13.2.

При работе контактной машины полная потребляемая мощность (S , кВ·А) из-за значительного индуктивного сопротивления вторичного контура только частично преобразуется в тепловую (P_A , кВт):

$$P_A = S \cdot \cos \varphi,$$

где $\cos \varphi = r_2/z_2$ — коэффициент использования мощности; $r_2 = r_{\text{эз}} + r_{\text{вн.к}} + r_{\text{тр}}''$ — активное сопротивление сварочной цепи, состоящее из активных сопротивлений свариваемых деталей и внешнего контура машины, а также активного сопротивления трансформатора, приведенного ко вторичной цепи;

$z_2 = \sqrt{(r_{\text{эз}} + r_{\text{вн.к}} + r_{\text{тр}}'')^2 + (x_{\text{вн.к}} + x_{\text{тр}}'')^2} = \sqrt{(r_{\text{эз}} + r_{\text{м}})^2 + x_{\text{м}}^2}$. — полное сопротивление сварочной цепи, $r_{\text{м}}$ и $x_{\text{м}}$ — активное и индуктивное сопротивления машины (см. рис. 13.2б).

В свою очередь только часть тепловой мощности ($P_{\text{эз}}$) расходуется на сварку (выделяется между электродами):

$$P_{\text{эз}} = P_A \cdot \eta,$$

где $\eta = r_{\text{эз}}/r_2$ — коэффициент полезного действия машины.

Для машин с источником питания переменного тока при сварке сталей $v = 0,2...0,6$, а при сварке алюминиевых сплавов $v = 0,02...0,1$.

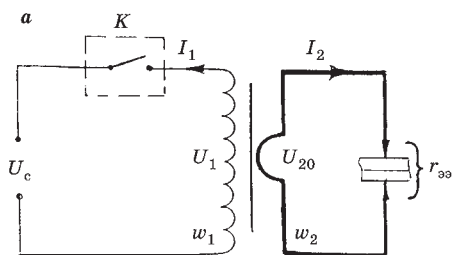
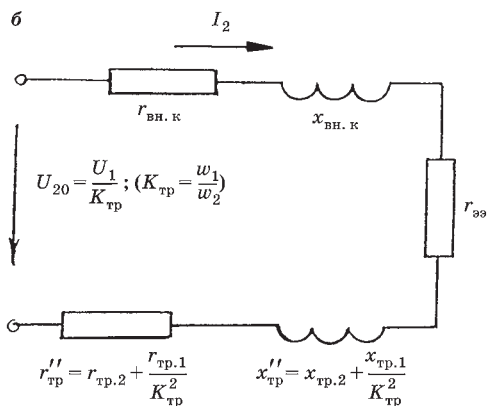


Рис. 13.2

Электрическая схема контактной машины переменного тока (а), ее схема замещения, приведенная ко вторичной цепи (б), и треугольник сопротивлений (в)



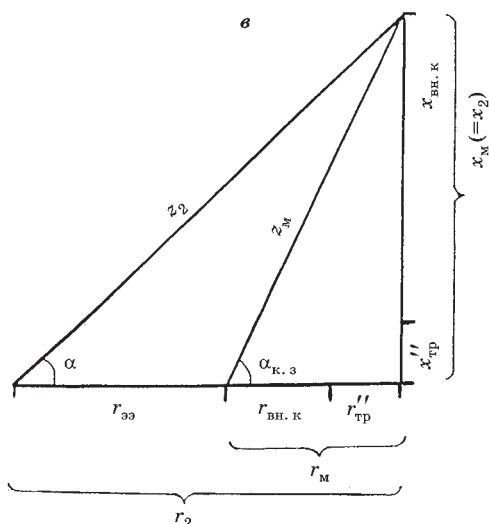
Обобщающей энергетической характеристикой контактных машин является степень полезного использования мощности

$$\nu = P_{30}/S = r_{30}/z_2 = \cos\varphi \cdot \eta.$$

Низкая степень полезного использования полной мощности контактными машинами переменного тока определяется большим индуктивным сопротивлением их вторичного контура $x_m = 200 \dots 300$ мкОм, особенно при значительных размерах вылета и раствора и относительно малом сопротивлением свариваемых деталей: $r_{30} = 8 \dots 20$ мкОм при сварке деталей из легких сплавов толщиной $3 \dots 0,3$ мм и $70 \dots 200$ мкОм при сварке сталей.

Анализируя выражение, определяющее степень полезного использования мощности $\nu = \frac{P_{30}}{S} = \frac{r_{30}}{\sqrt{(r_{30} + r_m)^2 + x_m^2}}$, можно наметить пути уменьшения энергозатрат на контактную сварку:

- снижение активного сопротивления машины (r_m) за счет предельно-возможного уменьшения габаритных размеров внешнего контура (l и h), использования наиболее электропроводных материалов для элементов контура, уменьшения количества контактов между ними и поддержания их сопротивления при эксплуатации машины в пределах паспортных значений;
- снижение индуктивного сопротивления машины (x_m) за счет понижения частоты сварочного тока (использование машин постоянного тока



и низкочастотных), уменьшения габаритных размеров внешнего контура, исключения ферромагнитных масс во внешнем контуре. Например, уменьшение вылета внешнего контура контактной машины переменного тока промышленной частоты с 1200 мм до 400 мм (при прочих равных условиях) приводит к повышению ν от 0,36 до 0,6. Замена переменного сварочного тока на постоянный повышает ν от 0,36 до 0,75 при одинаковом вылете внешнего контура ($l = 1200$ мм).

Нагрузочные и внешние характеристики контактной машины. Технологические возможности контактной машины и ее динамические свойства определяются нагрузочной $I_2 = f(r_{\text{вн}})$ или внешней $U_{\text{вн}} = f(I_2)$ характеристиками (рис. 13.3а, б).

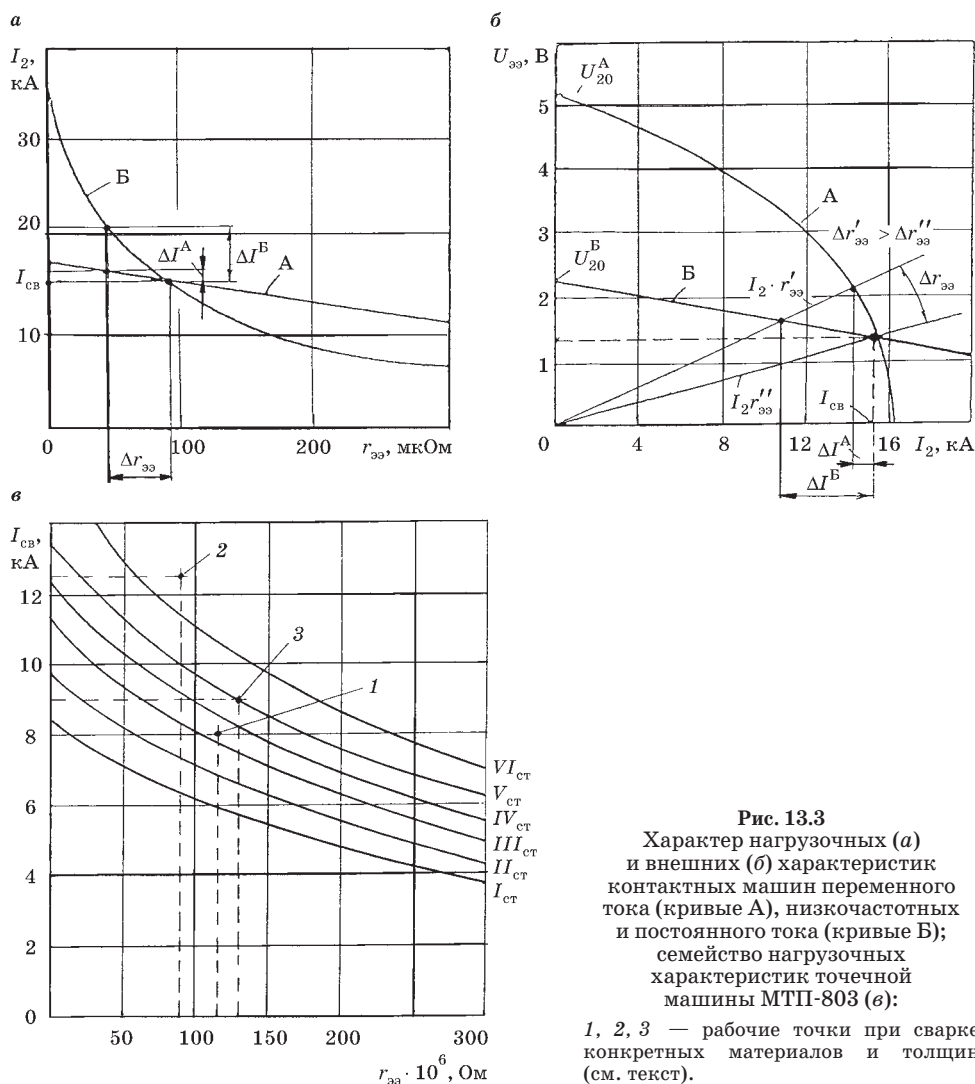


Рис. 13.3
Характер нагрузочных (а) и внешних (б) характеристик контактных машин переменного тока (кривые А), низкочастотных и постоянного тока (кривые В); семейство нагрузочных характеристик точечной машины МТП-803 (в):

1, 2, 3 — рабочие точки при сварке конкретных материалов и толщин (см. текст).

Пологая нагрузочная (или крутопадающая внешняя) *характеристика* (А), соответствующая машинам переменного тока ($r_{\text{эз}} < z_{\text{м}}$), указывает на наличие явления *стабилизации сварочного тока* при колебаниях сопротивления зоны сварки (ΔI мало при изменении $r_{\text{эз}}$).

Крутопадающая нагрузочная (или пологая внешняя) *характеристика* (Б), в наибольшей степени соответствующая низкочастотным машинам, а также машинам постоянного тока и машинам переменного тока для стыковой сварки оплавлением ($r_{\text{эз}} > z_{\text{м}}$), определяет возможность *саморегулирования сварочного тока*. Явление саморегулирования — автоматическое изменение сварочного тока (ΔI) при колебаниях сопротивления зоны сварки ($r_{\text{эз}}$), обеспечивает постоянство тепловыделения в зоне сварки и стабилизацию качества сварных соединений при износе электродов и увеличении диаметра их рабочей части, появлении шунтирующих цепей, колебаниях силы сжатия. Например, при стыковой сварке оплавлением саморегулирование значительно повышает устойчивость процесса оплавления. При увеличении по тем или иным причинам количества контактов (твердых или жидких) между торцами деталей, снижается сопротивление $r_{\text{эз}}$, что (при пологой внешней характеристике) приводит к значительному возрастанию тока оплавления, нагреву и интенсивному термомеханическому разрушению образовавшихся контактов. Если явление саморегулирования полностью не обеспечивает устойчивость процесса оплавления, используют системы автоматического регулирования (САР).

В паспорте контактной машины обычно приводятся нагрузочные (или внешние) характеристики для всех ступеней регулирования вторичного напряжения сварочного трансформатора. Такое семейство нагрузочных характеристик позволяет определить возможность использования данной машины для сварки деталей определенных толщин и марки металла. Например, имея семейство нагрузочных характеристик машины МТП-803 (рис. 13.3б), можно определить, что для сварки низкоуглеродистых сталей толщиной 1 + 1 мм ($I_{\text{св}} = 8$ кА, $r_{\text{эз}} = 115 \cdot 10^{-6}$ Ом, рабочая точка 1) необходимо установить четвертую ступень с фазовым подрегулированием сварочного тока. Сварку деталей из этой же стали 2 + 2 мм ($I_{\text{св}} = 12,5$ кА, $r_{\text{эз}} = 90 \cdot 10^{-6}$ Ом) машина не обеспечит — рабочая точка 2. Детали такой же толщины (2 + 2 мм), но выполненные из титанового сплава ОТ4 ($I_{\text{св}} = 9$ кА, $r_{\text{эз}} = 130 \cdot 10^{-6}$ Ом) могут быть сварены на пятой ступени (рабочая точка 3).

При отсутствии нагрузочных характеристик в паспорте машины для их построения (на каждой ступени трансформатора) можно воспользоваться аналитическими выражениями:

- для однофазных машин переменного тока:
$$I_2 = \frac{U_{20}}{\sqrt{(r_{\text{эз}} + r_{\text{м}})^2 + x_{\text{м}}^2}};$$
- для машин с выпрямлением во вторичном контуре ($x_{\text{м}} \approx 0$):
$$I_2 = \frac{U_{20}}{r_{\text{эз}} + r_{\text{м}}},$$

где U_{20} — напряжение холостого хода машины на данной ступени трансформатора; $r_{\text{м}}$ и $x_{\text{м}}$ ($z_{\text{м}}$) — активное и индуктивное (полное) сопротивление машины при коротком замыкании (паспортные данные); $r_{\text{эз}}$ при постороении $I_2 = f(r_{\text{эз}})$ выбирается в диапазоне от 0 до ≈ 300 мкОм.

Для внешних характеристик $U_{\text{эз}} = f(I_2)$ эти выражения примут вид: для однофазных машин переменного тока:

$$U_{\text{эз}} = \sqrt{U_{20}^2 - x_{\text{м}}^2 I_2^2 - r_{\text{м}} I_2},$$

- при холостом ходе $r_{\text{эз}} = \infty$, $I_2 = 0$, $U_{\text{эз}} = U_{20}$;
- при коротком замыкании $r_{\text{эз}} = 0$, $U_{\text{эз}} = 0$, $I_{2\text{max}} = U_{20}/z_{\text{м}}$;
- промежуточные точки находим при $I_2 < I_{2\text{max}}$.

Семейство внешних характеристик может быть также построено экспериментальными измерениями $U_{\text{эз}}$ и I_2 при опытах холостого хода, короткого замыкания и нескольких опытов с разной нагрузкой $r_{\text{эз}}$ на каждой ступени трансформатора.

Режим работы контактных машин. Машины для контактной сварки работают в повторно-кратковременном режиме (рис. 13.4), который характеризуется относительной продолжительностью включения ПВ, %:

$$\text{ПВ} = 100 t_{\text{св}} / (t_{\text{св}} + t_{\text{п}}) = 100 t_{\text{св}} / t_{\text{ц}},$$

где $t_{\text{св}}$ — время прохождения сварочного тока; $t_{\text{п}}$ — время паузы между импульсами сварочного тока; $t_{\text{ц}}$ — время повторяющихся циклов.

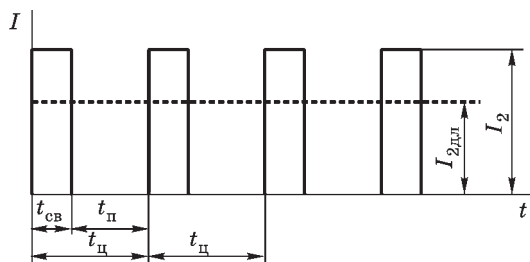


Рис. 13.4
Повторно-кратковременный (фактический) и длительный (расчетный) режимы работы контактной машины

Величина ПВ зависит от назначения машины и организации производства при изготовлении конкретного изделия. Для точечных машин эта величина не более 20%, для шовных машин — около 50%, для стыковых — 20...30%, а для трубосварочных станков — 100%. С учетом величины ПВ определяется номинальный длительный вторичный ток $I_{2\text{ном. дл}}$ — одна из технических характеристик контактных машин, являющаяся расчетной величиной, например при определении сечений элементов внешнего контура.

13.3. ЭЛЕКТРОДЫ КОНТАКТНЫХ МАШИН

Электроды (ролики, губки) являются особым элементом внешнего контура — сменным технологическим инструментом контактной машины. Они подводят ток к свариваемым деталям, обеспечивают их сжатие и перемещение (при шовной и стыковой сварке). Электроды работают

в сложных условиях теплового и механического воздействия — в условиях термоциклирования с температурой рабочей поверхности до 750°C и давлением на нее до 400 МПа.

Материал и конструкция электродов в большой степени определяют качество сварного соединения, производительность, а в некоторых случаях и возможность ведения процесса контактной сварки.

Требования к материалам электродов контактных машин целесообразно рассматривать в зависимости от их конкретного назначения. Например, рабочие поверхности *электродов точечных и шовных машин*, контактирующие со свариваемыми деталями, работают при высокой плотности тока (до 250...300 А/мм²). Материал электродов этой группы должен обладать высокой тепло- и электропроводностью (не ниже 70% электропроводности меди), малой склонностью к взаимодействию с металлом свариваемых деталей, особенно при сварке легких сплавов, большой твердостью (1000...1600 МПа), высокой температурой разупрочнения (400...500°C) при сварке коррозионно-стойких и жаропрочных сплавов. Чем выше электропроводность и твердость свариваемых материалов, тем выше должны быть эти показатели у материалов электрода.

Стойкость электродов при эксплуатации оценивается по недопустимому загрязнению рабочей поверхности электрода или увеличению ее диаметра на 20%. Так, например, при сварке низкоуглеродистых сталей число точек, сваренных до зачистки составляет 1000...2000, а до заправки рабочей части электрода в связи с увеличением d_s на 20% — 3000...5000. Аналогичные данные при сварке жаропрочных сплавов 300...500 и 1500...2000, алюминиевых — 20...300 и 1000...2000.

Электроды контактных машин для *стыковой и рельефной сварки* работают при сравнительно малых плотностях тока (до 12...15 А/мм²). К материалам этих электродов предъявляют пониженные требования по тепло- и электропроводности (до 35% электропроводности меди) и повышенные требования по твердости (до 1800...2000 МПа). Последнее условие позволяет обеспечить меньший износ электродов, более точную центровку заготовок при стыковой сварке и более равномерное распределение сил и тока при групповой рельефной сварке.

В таблице 13.1 приведены характеристики и назначение медных сплавов, используемых для изготовления электродов.

Таблица 13.1

Электродные материалы

Наименование сплава	Легирующие элементы, %	Твердость, МПа, не менее	Электропроводность по отношению к меди, %, не менее	Основное назначение сплава
Кадмиевая бронза БрКд1 (МК)	0,9...1,2 Cd	1000	85...90	Для электродов и роликов при сварке легких и медных сплавов
Серебряная бронза БрСр (МС)	0,07...0,12 Ag	950	90	
Хромокадмиевая бронза БрХКд (Мц5Б)	0,2...0,4 Cr 0,2...0,35 Cd	1100	80	

Наименование сплава	Легирующие элементы, %	Твердость, МПа, не менее	Электропроводность по отношению к меди, %, не менее	Основное назначение сплава
Хромовая бронза БрХ	0,4...1,0 Cr	1200	80...85	Для электродов и роликов при сварке титановых сплавов, низкоуглеродистых и низколегированных сталей
Хромоциркониевая бронза БрХЦр	0,4...1,0 Cr 0,03...0,08 Zr	1250		
Никельбериллиевая бронза БрНБТ	1,4...1,6 Ni 0,2...0,4 Be 0,05...0,15 Ti	1800	50	Для электродов, губок и роликов при сварке углеродистых и коррозионно-стойких сталей, жаропрочных сплавов
Кобальткремниевая бронза БрКХКо	0,4...0,8 Cr 1,3...1,8 Co 0,3...0,63 Si			

Особую группу материалов представляют вольфрам, молибден, эльконит ВМ (60–80% W, остальное медь). Они имеют высокую твердость и жаропрочность, что позволяет их использовать для вставок составных электродов при точечной и рельефной сварке, и низкую теплопроводность, используемую при сварке деталей с большой разницей толщин, деталей из разноименных металлов, а также металлов (серебро, медь, латунь), имеющих малое электрическое сопротивление и большую теплопроводность.

Для сварки алюминиевых и магниевых сплавов предложены металлокерамические электроды системы Cu-Al₂O₃ с содержанием оксидов до 3%. По электропроводности и твердости они аналогичны кадмиевой бронзе, но имеют более высокую жаропрочность и замедленный процесс химического взаимодействия со свариваемым материалом.

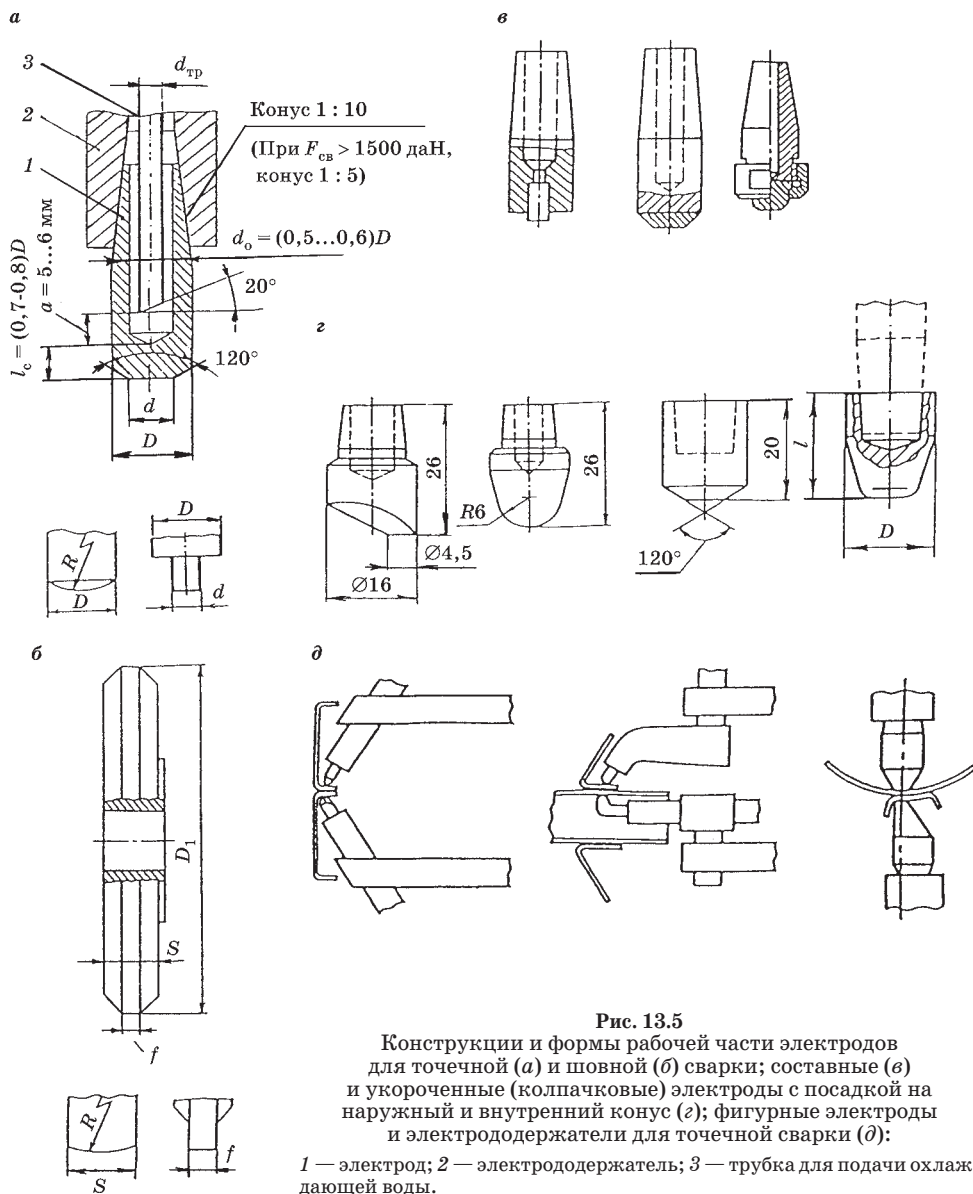
Конструкция и основные размеры рабочей части прямых электродов для точечной сварки (ГОСТ 14111-90) и роликов для шовной сварки представлены на рисунке 13.5а, б. Находят применение составные электроды и электроды со сменными колпачками (рис. 13.5в, г), позволяющие снизить расход электродного материала.

Плоскоконическая форма рабочей поверхности электрода позволяет повышать сварочный ток, увеличивать размеры ядра, упрощает изготовление и заправку электродов, широко применяется при сварке сталей.

Сферическая форма рабочей поверхности лучше отводит тепло, более устойчива при повышенных $F_{сж}$, допускает перекося электродов, наиболее целесообразна при сварке легких сплавов.

Размеры и форма рабочей поверхности электродов влияют на размеры и стабильность литой зоны соединения, поэтому их начальные значения устанавливаются в соответствии с толщиной свариваемых деталей (табл. 13.2).

Для точечной сварки соединений сложной формы применяются фигурные электроды и электрододержатели (рис. 13.5д), а при рельефной сварке — электроды разнообразной конструкции, зависящей от конфигурации свариваемых деталей (рис. 13.6).



Губки (электроды) стыковых машин подводят ток к свариваемым деталям, обеспечивают их соосность и удерживают от проскальзывания при осадке. Длину губок для обеспечения соосности свариваемых деталей выбирают не менее 3...4 диаметров стержней или труб, а при сварке полос — не менее 10 их толщин.

Большое значение для получения качественного соединения имеет конструкция сварочных губок. Наибольшее распространение получили губки (рис. 13.7а) с призматическими пазами для сварки круглых деталей сплошного

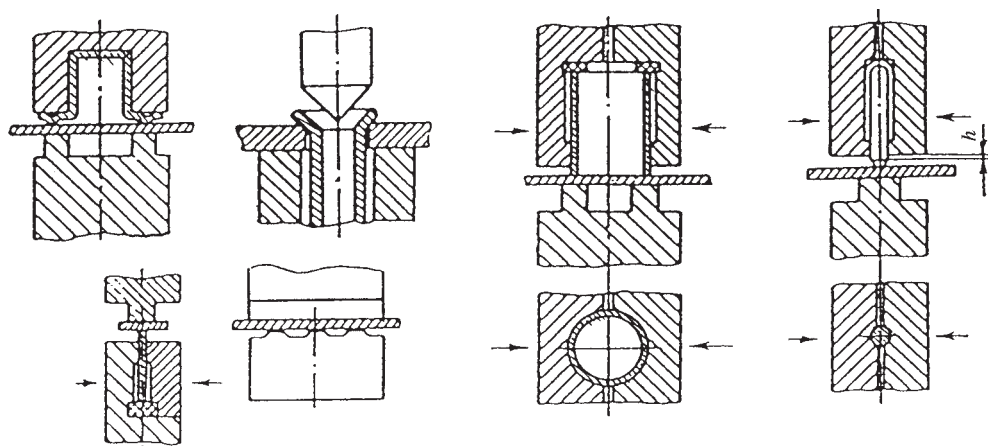


Рис. 13.6
Специальные электроды для рельефной сварки

сечения и цилиндрическими пазами для сварки тонкостенных труб. Для стыковой сварки листов обычно используют плоские электроды с нижним токоподводом. Надежное закрепление тонких листов достигается применением электродов с криволинейной поверхностью, повышающей устойчивость заготовок при осадке.

Таблица 13.2

Рекомендуемые размеры рабочей части электродов и роликов (см. рис. 13.5)

Толщина деталей, мм	При сварке углеродистых, нержавеющей, жаропрочных сталей и сплавов					При сварке алюминиевых, магниевых и медных сплавов		
	D	d	R	S	f	D	S	R
0,3	12	3	12–25	6	3	12	12	25
0,5		4	25–50		4			50
0,8		5	50–75		5			50–75
1,0			75–100		5			75
1,2	16	6	100–150	12	6	20	20	75–100
1,5		7			7			
2,0	20	8	150–200	15	8	25	25	100
2,5		9		18	9			100–150
3,0		10		20	10			
3,5		11	200–250	22	11			150
4,0	25	12		24	11	32	32	200
5,0		—	250	—	—			250
6,0		—		—	—			
7,0	32	—		—	—	40	—	300

Примечание: Размеры D и S — минимальные рекомендуемые.

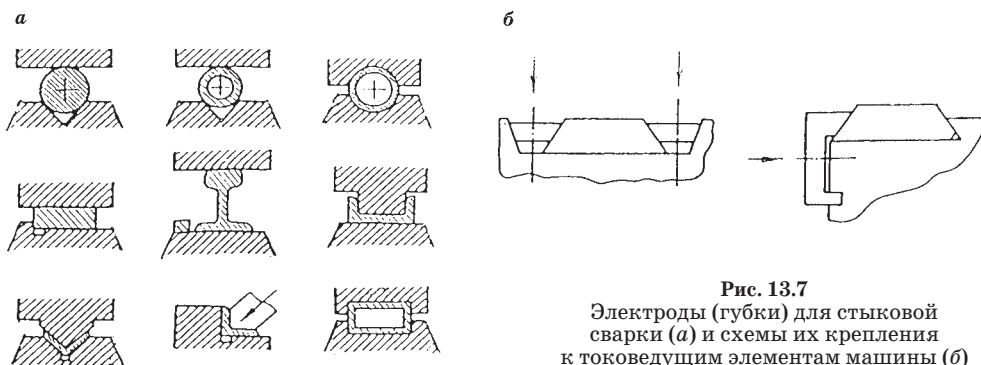


Рис. 13.7
 Electrodes (gubki) for butt welding (a) and schemes of their fastening to current-carrying elements of a machine (b)

На рисунке 13.7б показаны схемы крепления токоведущих губок, обеспечивающие их быструю замену и регулировку положения в горизонтальной плоскости. Для регулировки в вертикальном направлении можно воспользоваться клиновинтовой парой или другими более сложными механизмами.

При эксплуатации электродов необходимо поддерживать форму и размеры рабочей поверхности электродов. Зачистка электродов обычно производится в сварочной машине личным напильником и абразивным полотном. При этом необходимо сохранить параллельность рабочих поверхностей обоих электродов. Электроды со сферической поверхностью зачищаются с помощью резиновой пластины толщиной 15–20 мм, обернутой абразивным полотном. Для восстановления размеров рабочей поверхности электродов используются переносные фрезерные головки. Особое внимание надо обращать на обеспечение хорошего электрического контакта посадочных поверхностей с электрододержателями и осями роликов.

Для съема электродов необходимо пользоваться специальными съемниками или предусматривать в конструкции электродов и электрододержателей систему выталкивания электродов.

13.4. КОНТАКТОРЫ

13.4.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОНТАКТОРОВ

Контакты — силовые коммутирующие устройства, обеспечивающие включение и выключение переменного электрического тока в первичной цепи источников питания контактных машин.

В настоящее время в отечественных и зарубежных машинах широко используются управляемые тиристорные и транзисторные контакты, в меньшей степени — электромагнитные. В машинах старых выпусков применялись игнитронные и механические контакты.

Управление контактами осуществляется концевыми выключателями, реле времени в сочетании с блоками фазового регулирования или микропроцессорными системами.

Тиристорные контакты обеспечивают не только заданное время сварки, но также величину и форму импульса сварочного тока, например, обеспечивают его плавное нарастание и спад, многоимпульсную сварку.

По характеру включения различают асинхронные и синхронные контакты.

13.4.2. АСИНХРОННЫЕ КОНТАКТОРЫ

Асинхронные контакторы, например, электромагнитные (рис. 13.8а, б) осуществляют включение и выключение тока в моменты времени, не синхронизированные (не согласованные) с фазой синусоидального напряжения сети (точки А и Б на рис. 13.8з). При этом в электрической цепи контактной машины возникают переходные процессы приводящие к искажению синусоиды тока в первые 1–2 периода, а также в конце процесса.

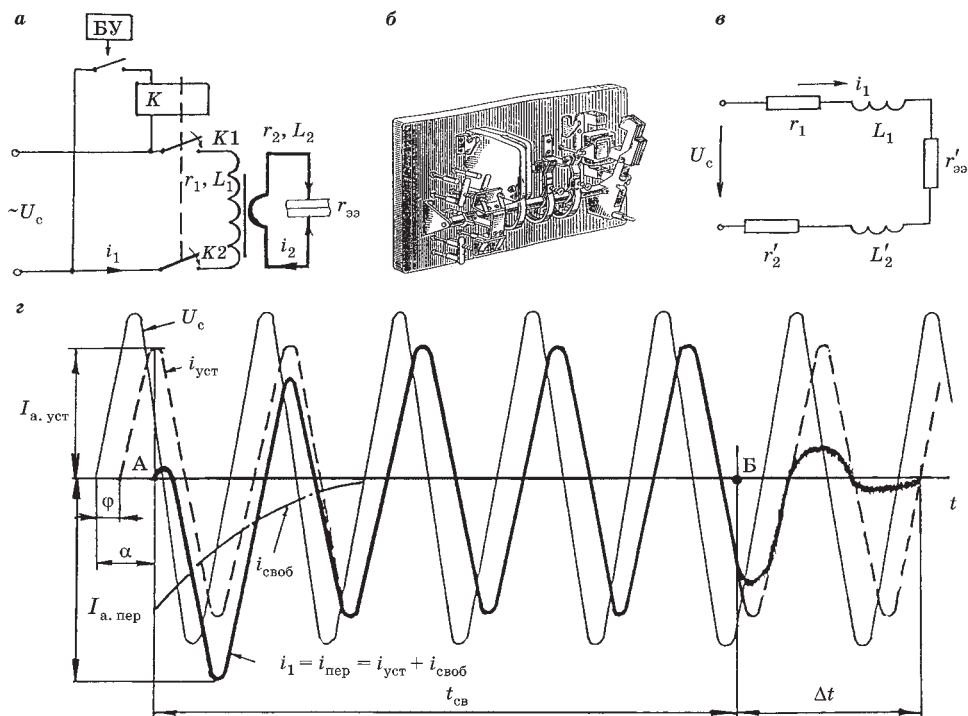


Рис. 13.8

Электрическая схема (а) и внешний вид (б) электромагнитного контактора; электрическая схема замещения контактной машины, приведенная к первичной цепи (в), и характер тока при асинхронном включении и выключении контактора (г)

Дифференциальное уравнение переходного процесса в соответствии со вторым законом Кирхгофа для электрической схемы контактной машины приведенной к первичной цепи (рис. 13.8в), записывается в виде

$$L \frac{di_1}{dt} + i_1 r = U_c,$$

где $L = L_1 + L_2'$ и $r = r_1 + r_2' + r_{33}'$ — индуктивность и активное сопротивление контактной машины, приведенные к первичной цепи.

Полным решением такого неоднородного дифференциального уравнения первого порядка, является сумма двух решений:

$$i_1 = i_{уст} + i_{своб},$$

где $i_{\text{уст}} = I_a \sin(\omega t + \alpha - \varphi)$ — установившийся после окончания переходного процесса ток в электрической цепи — частное решение неоднородного дифференциального уравнения; φ — фазовый угол смещения $i_{\text{уст}}$ по отношению к U_c , зависящий от соотношения r и L данной контактной машины; α — фазовый угол, фиксирующий произвольный момент включения контактора по отношению к синусоиде напряжения сети; $i_{\text{своб}}$ — свободный ток, имеющий место только в период переходного процесса, определяемый как общее решение однородного дифференциального уравнения:

$$L \frac{di_{\text{своб}}}{dt} + i_{\text{своб}} r = 0.$$

После интегрирования получаем $i_{\text{своб}} = A_1 e^{-t/\tau}$, где $\tau = L/r$ — постоянная времени переходного процесса.

Таким образом, решение неоднородного дифференциального уравнения переходного процесса может быть записано в виде

$$i_1 = i_{\text{уст}} + i_{\text{своб}} = I_a \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + A_1 e^{-t/\tau}.$$

Постоянная интегрирования A_1 определяется из начальных условий процесса: в момент времени $t = 0$ ток в цепи $i_1 = 0$. Окончательно имеем выражение для тока в первичной цепи контактной машины при асинхронном включении ее в произвольной точке А, характеризующейся фазовым углом α (рис. 13.8з):

$$i_1 = I_a \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - I_a \sin(\alpha - \varphi) e^{-t/\tau}.$$

При неблагоприятных условиях включения ($\alpha = \varphi + 90^\circ$), амплитудное значение тока переходного процесса может превышать амплитудное значение установившегося тока до 1,7 раза.

При выключении тока асинхронным электромагнитным контактором в произвольный момент времени по отношению к фазе напряжения сети (точка Б, рис. 13.8з), из-за образования дуги между силовыми контактами при их размыкании ток в электрической цепи продолжает протекать в течение нестабильного отрезка времени Δt (до 0,1с).

Несовершенства асинхронных контакторов, приводящие к нестабильному дозированию энергии на каждую сварку и, следовательно, к нестабильному качеству соединения, делают их неприемлемыми при точечной и шовной сварке, особенно на жестких режимах ($t_{\text{св}} < 0,2$ с). Кроме этого контакторы на большую мощность имеют значительные размеры, малый срок службы и малое число включений в минуту.

Электромагнитные асинхронные контакторы могут быть использованы в машинах с большой длительностью сварочного процесса, например при стыковой сварке непрерывным оплавлением, в шовных машинах с непрерывным протеканием тока (трубосварочные станы).

13.4.3. СИНХРОННЫЕ КОНТАКТОРЫ

Синхронные контакторы (например, управляемые тиристорные) обеспечивают включение тока в каждом полупериоде в определенные регулируемые моменты времени, синхронизированные с фазой сетевого

напряжения (т. е. с определенным регулируемым фазовым углом включения α). Выключение тока в каждом полупериоде происходит за счет выключения тиристора при переходе тока через нулевое значение. Таким образом, синхронные контакторы работают в режиме управляемого переходного процесса в каждом полупериоде (рис. 13.9а). Это определяет стабильное дозирование энергии на каждую сварку при $\alpha = \text{const}$, возможность плавного регулирования величины сварочного тока и его модуляцию при $\alpha = f(t)$ в начале и в конце процесса сварки (рис. 13.9б).

Диапазон регулирования действующего значения сварочного тока оценивается коэффициентом глубины регулирования $K_i = I_{\alpha > \varphi} / I_{\alpha = \varphi}$, где $I_{\alpha > \varphi}$ — действующее значение тока, устанавливаемое за счет фазового регулирования тиристорного контактора (рис. 13.9а); $I_{\alpha = \varphi}$ — действующее значение тока при полнофазном включении (рис. 13.9в).

Наибольшее распространение в отечественных контактных машинах получили синхронные тиристорные контакторы КТ-07 с воздушным охлаждением, КТ-11 и КТ-12 с водяным охлаждением на номинальные токи 480, 1000 и 1750 А соответственно, а также малогабаритные водоохлаждаемые тиристорные контакторы КТЖМ-125М и КТЖМ-250М на номинальные токи 335 и 500 А (при максимальной длительности импульса сварочного тока 0,5 с и ПВ = 20%). На рисунке 13.10 приведена электрическая схема тиристорного контактора. Защита тириستоров от импульсных перенапряжений осуществляется варистором R_V , для ограничения скорости нарастания напряжения использована цепочка $R_1 C_1$. В схему контактора также включен унифицированный блок индикации полнофазного включения на базе лампы тлеющего разряда МТХ-90.

К преимуществам тиристорных контакторов можно отнести: плавное регулированное сварочного тока, слаботочные цепи управления, дистанционное управление, высокая долговечность.

Стабильный и рациональный режим работы синхронного контактора обеспечивается при $(\varphi + 5^\circ) < \alpha < (\varphi + 60^\circ)$. При $\alpha < \varphi$ возможно появление полуволнового эффекта (однополупериодного выпрямления тока), приводящего к насыщению магнитопровода сварочного трансформатора и аварийному режиму контактной машины.

Недостатком тиристорных контакторов является появление значительных пауз между импульсами тока в каждом полупериоде (особенно при глубоком фазовом регулировании $\alpha > \varphi + 60^\circ$), во время которых происходит интенсивный отвод тепла из зоны соединения. При сварке высокотеплопроводных сплавов (Al, Mg, Cu) это приводит к уменьшению диаметра ядра точки и, следовательно, к снижению прочности соединения. Для предотвращения этого явления, необходимо увеличивать действующее значение сварочного тока по отношению к значениям, указанным в технологических таблицах. Например, если при сварке деталей из алюминиевого сплава толщиной 1 мм на машине переменного тока большой мощности необходимая величина сварочного тока устанавливается за счет глубокого фазового регулирования ($\alpha \approx \varphi + 90^\circ$), то для получения качественного соединения (по ГОСТ 15878-79) необходимо увеличить величину действующего значения тока в 1,5 раза (рис. 13.11)!

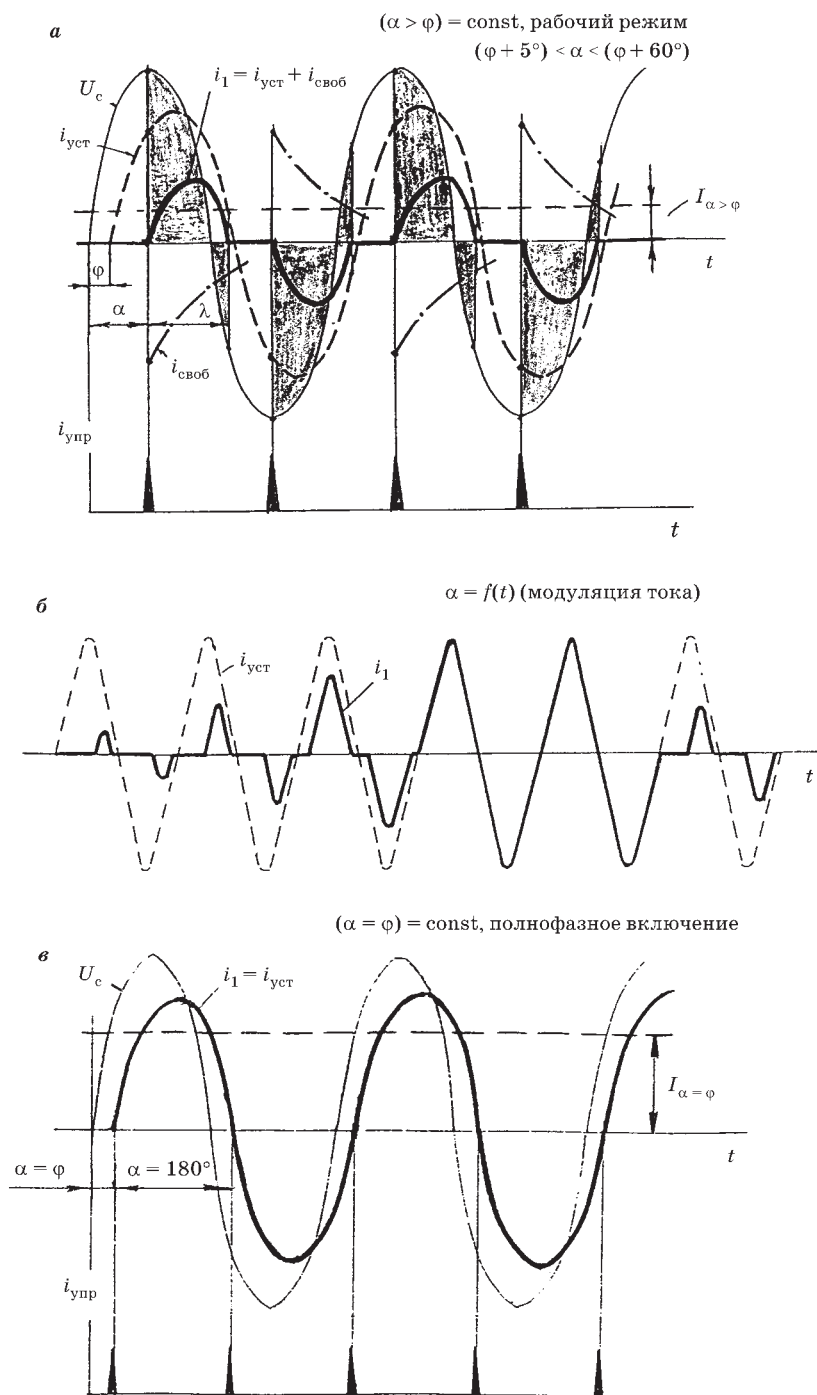


Рис. 13.9
 Временные диаграммы напряжения и тока при работе
 синхронного тиристорного контактора

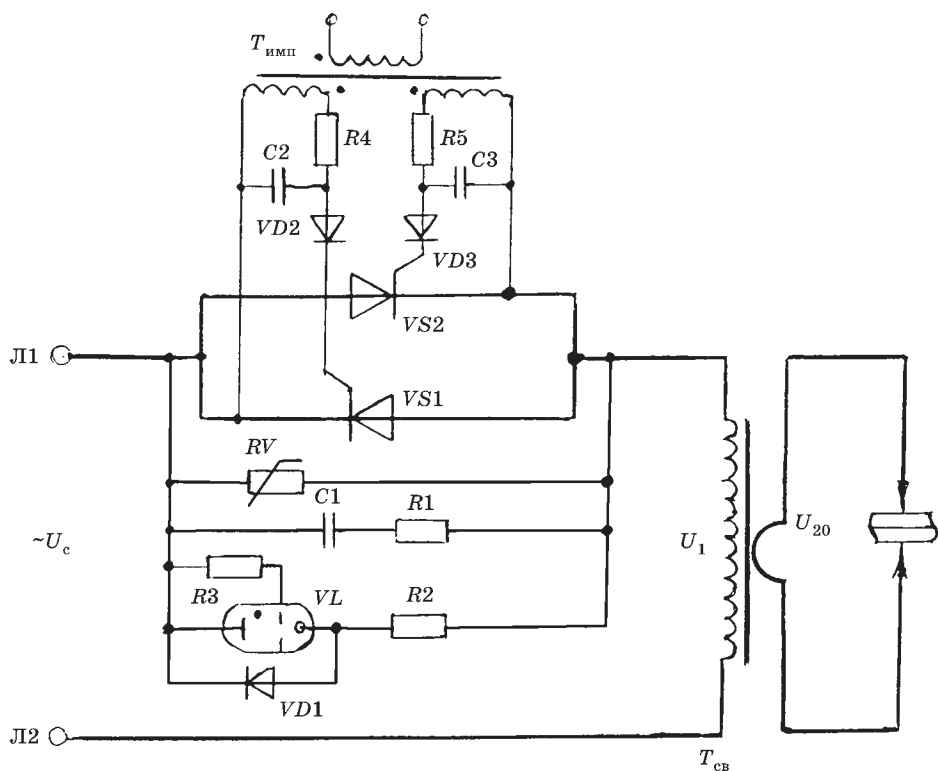


Рис. 13.10
Электрическая схема тиристорного контактора КТ-07

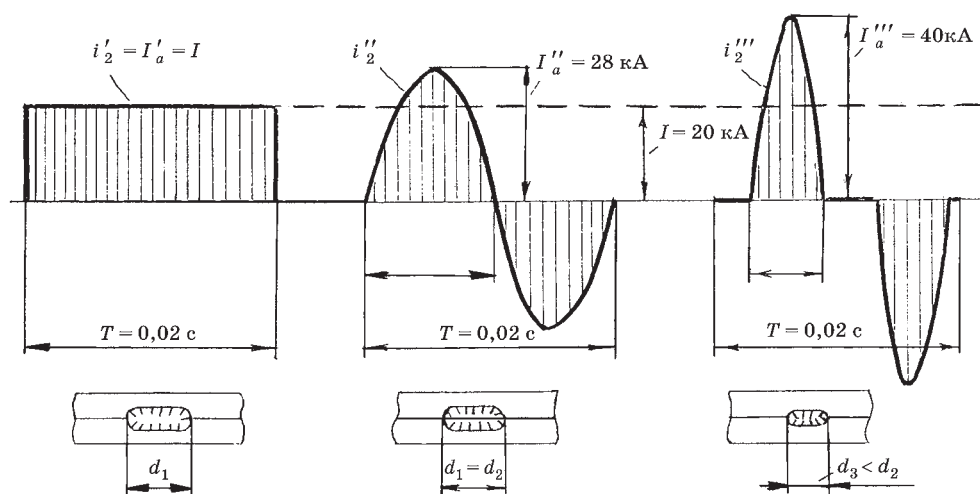


Рис. 13.11
Влияние формы импульса тока (глубины фазового регулирования) на диаметр точки при одинаковых действующих значениях сварочного тока

Кроме этого, при плавном регулировании тока за счет фазовой отсечки на первичную обмотку сварочного трансформатора подается искаженная синусоида напряжения (затемненная часть $U_1 = f(t)$ на рис. 13.9а), что приводит к появлению в сварочной цепи высоких гармоник напряжения и тока, повышающих индуктивное сопротивление трансформатора и внешнего контура.

Все вышесказанное позволяет сформулировать подход к рациональной схеме регулирования сварочного тока в контактных машинах.

1. В специальных контактных машинах, применяемых в серийном производстве (например, автомобилестроение) и не требующих в процессе работы глубокого регулирования сварочного тока $K_i \geq 0,8$, целесообразно использовать только фазовое регулирование, обеспечиваемое тиристорными контакторами. В этом случае сварочный трансформатор имеет постоянный коэффициент трансформации. Блок обмоток, при отсутствии дополнительных отводов от первичной обмотки, получается более компактным, что приводит к снижению габаритов и массы всего трансформатора.

2. В универсальных контактных машинах целесообразно предусматривать смешанное регулирование сварочного тока: 2...4 ступени грубого регулирования за счет изменения коэффициента трансформации сварочного трансформатора (изменение числа витков первичной обмотки, подключаемых к сети) и плавного фазового регулирования внутри каждой ступени. Такая схема регулирования сварочного тока обеспечивает экономически более выгодную эксплуатацию контактной машины.

13.5. ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ОСНОВНЫХ ВИДОВ КОНТАКТНЫХ МАШИН

Классификация источников сварочного тока контактных машин. Гибкость технологии контактной сварки в значительной степени определяется возможностями получения широкой гаммы величины, длительности и формы импульса сварочного тока, что, в свою очередь, зависит от используемых в машинах источников сварочного тока, структуры и величины сопротивления внешнего контура, контакторов и аппаратуры управления.

В настоящее время по характеру источников сварочного тока используют пять видов контактных машин:

- однофазные машины переменного тока промышленной частоты;
- трехфазные низкочастотные машины;
- машины переменного тока повышенной частоты (800...2000 Гц);
- трехфазные машины с выпрямлением сварочного тока во вторичной цепи (машины постоянного тока), в том числе с промежуточным звеном повышенной частоты;
- конденсаторные машины.

Одним из основных элементов любого источника сварочного тока контактной машины является понижающий однофазный или трехфазный сварочный трансформатор.

Особенностями сварочных трансформаторов контактных машин являются:

- большой вторичный ток (от единиц до сотен тысяч ампер);
- наличие во вторичной обмотке одного витка, $w_2 = 1$ (исключением являются конденсаторные машины $w_2 = 1...3$ и подвесные точечные машины $w_2 = 1...2$);
- малое сопротивление нагрузки z_2 (десятки–сотни микроом);
- низкое вторичное напряжение холостого хода $U_{20} = 1...8$ В (в подвесных машинах с отдельным трансформатором до 20 В);
- повторно-кратковременный режим работы;
- применение водяного охлаждения вторичной обмотки.

Однофазные контактные машины переменного тока промышленной частоты. Источником переменного сварочного тока промышленной частоты является однофазный понижающий сварочный трансформатор (рис. 13.12а). Первичная обмотка трансформатора с регулируемым числом витков через управляемый тиристорный контактор подключена к электрической сети 380 В, 50 Гц (для машин мощностью до 60 кВ·А — допускается 220 В).

Источники переменного тока промышленной частоты широко применяются как в машинах общего назначения, так и в специальных машинах для сварки преимущественно малогабаритных узлов из металлов и сплавов с относительно высоким удельным сопротивлением (стали, титановые сплавы) с использованием сварочных токов 5...70 кА.

Регулирование сварочного тока обеспечивается ступенчатым изменением числа витков первичной обмотки сварочного трансформатора и плавным регулированием фазы включения тириستоров контактора.

Характерными особенностями источников переменного тока промышленной частоты являются:

- широкие возможности регулирования величины, длительности и формы импульса сварочного тока, в том числе с плавным нарастанием и спадом тока (имеется возможность выполнения многоимпульсной сварки и сварки одним полупериодом);
- пологая нагрузочная характеристика ($r_{\text{зо}} < z_{\text{м}}$), обеспечивающая автоматическую стабилизацию сварочного тока при колебании сопротивления зоны сварки ($r_{\text{зо}}$);
- большое индуктивное сопротивление и, соответственно, общее электрическое сопротивление машины — $z_{\text{м}} \geq 200...300$ мкОм, что приводит к малому $\cos\varphi = 0,2...0,6$ и низкой степени полезного использования мощности, забираемой из сети ($\nu < 0,4$), особенно при наличии ферромагнитных масс свариваемых деталей и приспособлений во внешнем контуре и больших его размерах ($l > 800$ мм и $h > 300$ мм);
- перекося фаз и падение напряжения в сети при кратковременном включении мощной однофазной нагрузки в трехфазную сеть.

Трехфазные низкочастотные контактные машины. Источники сварочного тока низкочастотных машин сформированы из двух управляемых трехфазных выпрямителей, включенных встречно-параллельно, и однофазного понижающего сварочного трансформатора с регулируемым числом витков первичной обмотки (рис. 13.12б). При каждом импульсе постоянного напряжения U_d ,

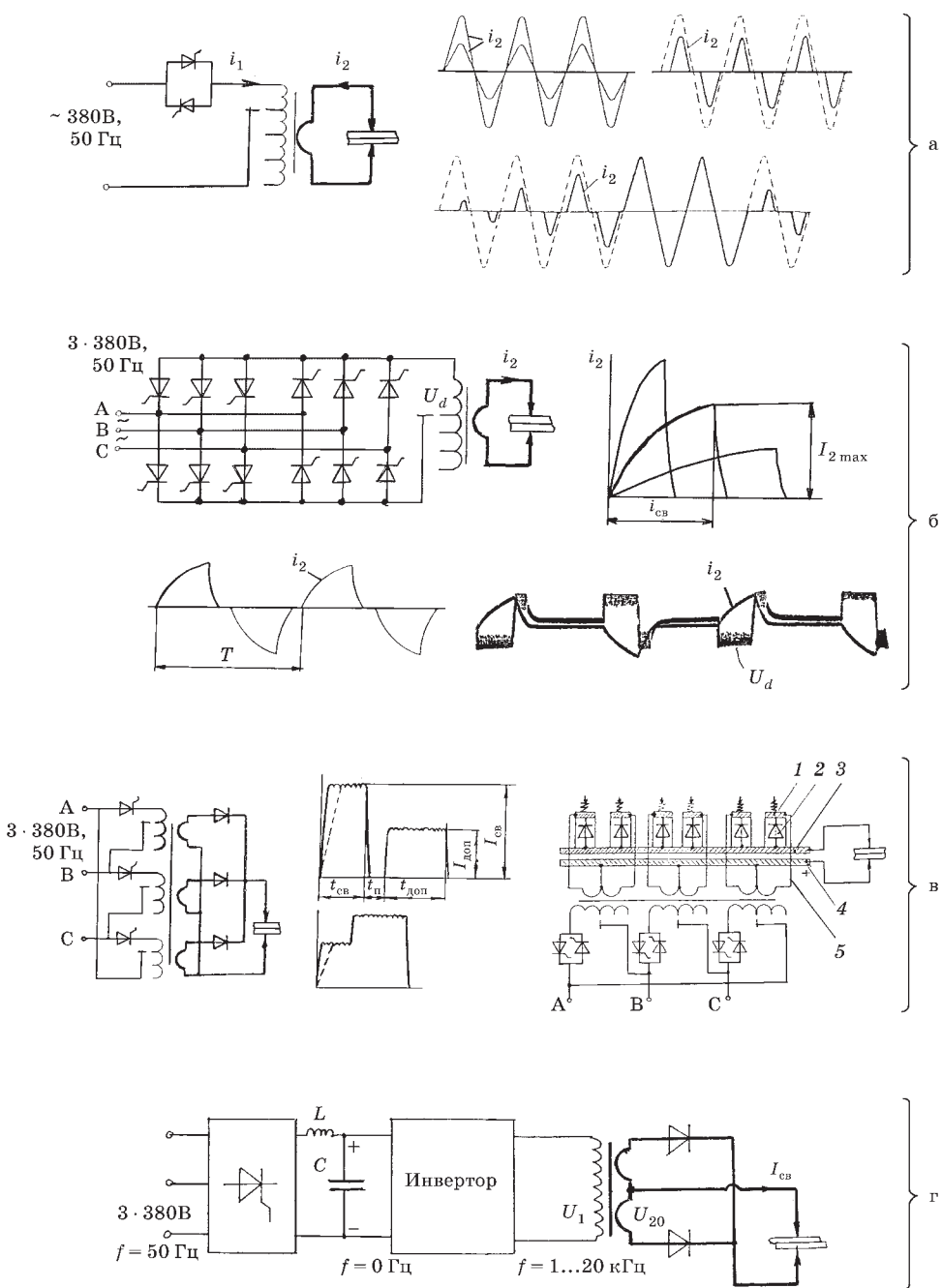


Рис. 13.12

Электрические схемы и характер импульсов сварочного тока:

а — контактной машины переменного тока промышленной частоты; б — низкочастотной контактной машины; в — машины постоянного тока с однополупериодным и двухполупериодным выпрямлением; г — контактной машины постоянного тока с промежуточным звеном повышенной частоты.

приложенном к первичной обмотке сварочного трансформатора в течение времени $t_{св}$, в первичной цепи развивается переходный процесс и формируется первичный и, соответственно, вторичный ток i_2 по экспоненциальному закону. Регулирование импульса сварочного тока обеспечивается изменением напряжения U_d , числа витков первичной обмотки трансформатора и временем $t_{св}$. При шовной сварке используют серию импульсов чередующейся полярности с частотой 1...10 Гц; при точечной и рельефной сварке формирование сварного соединения осуществляется одним импульсом.

Характерными особенностями низкочастотных машин являются:

- хорошая технологическая форма импульса сварочного тока — плавное нарастание и спад, что особенно желательно при сварке легких сплавов;
- низкая частота сварочного тока определяет малое индуктивное сопротивление вторичного контура машины и, следовательно, высокие $\cos\phi$ и степень полезного использования полной мощности, потребляемой из сети, даже при сварке крупногабаритных узлов и при наличии ферромагнитных масс во внешнем контуре;
- ограниченное время протекания сварочного тока $t_{св} < 0,4$ с;
- увеличенное сечение и масса магнитопровода сварочного трансформатора (расчетное сечение магнитопровода обратно пропорционально частоте);
- крутопадающая нагрузочная характеристика ($r_{э\phi} > z_m$), обеспечивающая эффект саморегулирования сварочного тока при колебаниях сопротивления зоны сварки ($\Delta r_{э\phi}$);
- равномерная загрузка трехфазной сети, но падение напряжения в сети при кратковременном включении мощной нагрузки.

Контактные машины постоянного тока. Источники сварочного тока машин постоянного тока состоят из трехфазного понижающего сварочного трансформатора (с регулируемым числом витков первичной обмотки), подключенного к электрической сети через управляемый тиристорный контактор, и выпрямительного диодного блока. В машинах с большим вылетом используется простая и надежная схема трехфазного однополупериодного выпрямления (рис. 13.12а). Индуктивность вторичного контура таких машин настолько велика, что даже при однополупериодном выпрямлении глубина пульсации сварочного тока весьма мала и удовлетворяет технологическим требованиям.

В мощных машинах и машинах с малым рабочим пространством внешнего контура для обеспечения высоких энергетических характеристик (в первую очередь, повышения коэффициента использования мощности) и малой глубины пульсаций выпрямленного сварочного тока, используется схема шестифазного (двуполупериодного) выпрямления.

Существенное влияние на энергетические характеристики источника постоянного тока, кроме схемы выпрямителя, оказывают параметры применяемых диодов и конструктивное исполнение фазовых цепей, определяющее их активное и индуктивное сопротивление. Все шесть диодов выпрямителя установлены на горизонтально расположенном групповом охладителе, закрепленном непосредственно на сварочном трансформаторе. Групповой охладитель является отрицательным полюсом выпрямителя и присоединен к верхней ветви внешнего контура. Соответствующие выводы вторичных обмоток

трансформатора подключены к диодам с помощью гибких шин и индивидуальных охладителей, прижатых к диодам через тарельчатые пружины. Вторым (положительным) полюсом выпрямителя является шина, подсоединяющая «нулевые» выводы вторичных обмоток сварочного трансформатора к нижней ветви внешнего контура машины.

Применение мощных низковольтных диодов Д253-4000, АУS601 на сварочные токи 60 кА позволяет ограничиться одним диодом в каждой фазе выпрямителя и сформировать компактный трансформаторно-выпрямительный блок.

Схема управления обеспечивает сварку одним или двумя импульсами постоянного тока с модуляцией переднего фронта первого импульса. Ток каждого импульса имеет независимое регулирование в пределах 40% от максимального значения на данной ступени трансформатора. Регулируется также длительность каждого импульса и пауза между ними. Импульсы могут следовать друг за другом без паузы.

Машины постоянного тока целесообразно использовать при сварке крупногабаритных изделий из алюминиевых и титановых сплавов, жаропрочных и коррозионно-стойких сталей и др. металлов.

Характерные особенности машин постоянного тока:

- широкие возможности регулирования величины и формы унipoлярного импульса сварочного тока;
- малая глубина пульсаций тока, обеспечивающая эффективный ввод энергии и получение максимальных размеров сварного соединения без выплесков, особенно при сварке тонких и разнотолщинных деталей;
- равномерный нагрев кромок при шовно-стыковой сварке (в том числе с раздавливанием кромок), позволяющий увеличить скорость сварки до 100 м/мин;
- отсутствие ограничений на длительность импульса сварочного тока;
- отсутствие поверхностного эффекта позволяющее уменьшить величину сварочного тока и, следовательно, зону термического влияния, снизить нагрев контакта электрод — деталь и повысить стойкость электродов, уменьшить степень повреждения поверхности металла под электродом;
- высокие $\cos\varphi$ и степень полезного использования полной мощности, забираемой из сети;
- крутопадающая нагрузочная характеристика, обеспечивающая явление саморегулирования сварочного тока при колебаниях сопротивления зоны сварки;
- равномерная загрузка трех фаз;
- падение напряжения в сети при кратковременном включении мощной нагрузки.

В настоящее время в роботизированных технологических комплексах (РТК) для контактной сварки, а также в приборостроении широко используются *источники постоянного сварочного тока с промежуточным звеном повышенной частоты*. Такие источники позволяют в несколько раз уменьшить габариты и массу сварочного трансформатора, что имеет большое значение при проектировании робототехнических комплексов, а также позволяют получать кратковременные импульсы сварочного тока с незначительной глубиной пульсаций, что важно при сварке малой и разной толщины в приборостроении.

Принципиальная электрическая схема источника включает в себя трехфазный двухполупериодный выпрямитель, низкочастотный фильтр, инвертор, однофазный сварочный трансформатор со средней точкой во вторичной обмотке и двухполупериодный выпрямитель (см. рис. 3.12г).

Контактные машины переменного тока повышенной частоты. Источники сварочного переменного тока повышенной частоты ($f = 400 \dots 2000$ Гц) включают в себя трехфазный выпрямитель, сглаживающий фильтр, управляемый инвертор на базе транзисторов или тиристоров и понижающий трансформатор (рис. 13.13б). При работе инвертора на фиксированной рабочей частоте поочередно открываются пары транзисторов VT1, VT2 и VT3, VT4. При этом на первичную обмотку сварочного трансформатора подаются импульсы переменного напряжения прямоугольной формы (рис. 13.13а). Изменяя значение уставки ($I_{уст1}, I_{уст2} \dots$) в каждом периоде повышенной частоты, получаем различные формы импульсов сварочного тока (рис. 13.13в, г).

Характерными особенностями машин переменного тока повышенной частоты являются:

- возможность получения кратковременных импульсов сварочного тока ($t_{св} = 1 \dots 50$ мс) и управление их формой по заданной программе;
- значительное уменьшение габаритов и массы сварочного трансформатора;
- равномерная загрузка трех фаз;
- повышенное индуктивное сопротивление сварочной цепи — не следует применять при увеличенных габаритах внешнего контура и больших сварочных токах.

Источники переменного тока повышенной частоты целесообразно использовать при сварке и пайке деталей толщиной от нескольких микрометров до 0,5 мм, а также при шовной сварке тонкого металла на повышенных скоростях.

Конденсаторные машины. Источники сварочного тока конденсаторных машин (рис. 13.14) состоят из повышающего трансформатора, управляемого выпрямителя, зарядного коммутирующего устройства, батареи конденсаторов с регулируемой емкостью, разрядного коммутирующего устройства и понижающего сварочного трансформатора с регулируемым числом витков в первичной обмотке.

Отличительной особенностью конденсаторного источника тока является наличие двухконтурной электрической схемы. Первый контур (А, рис. 13.14а), связанный с электрической сетью, обеспечивает зарядку батареи конденсаторов C до заданного напряжения U_c . Таким образом накапливается строго определенное количество энергии $E = \frac{CU_c^2}{2}$. При этом за счет увеличения времени зарядки можно существенно снизить мощность, потребляемую из сети в момент зарядки.

Второй контур (Б) — сварочный — работает автономно (не связан с электрической сетью). Накопленная в батарее конденсаторов энергия разряжается через коммутирующее устройство на первичную обмотку сварочного трансформатора. В разрядной цепи возникает затухающий (при $r < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$) колебательный процесс с частотой $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{4L^2}}$, где r и L — электрические параметры машины, приведенные к первичной цепи.

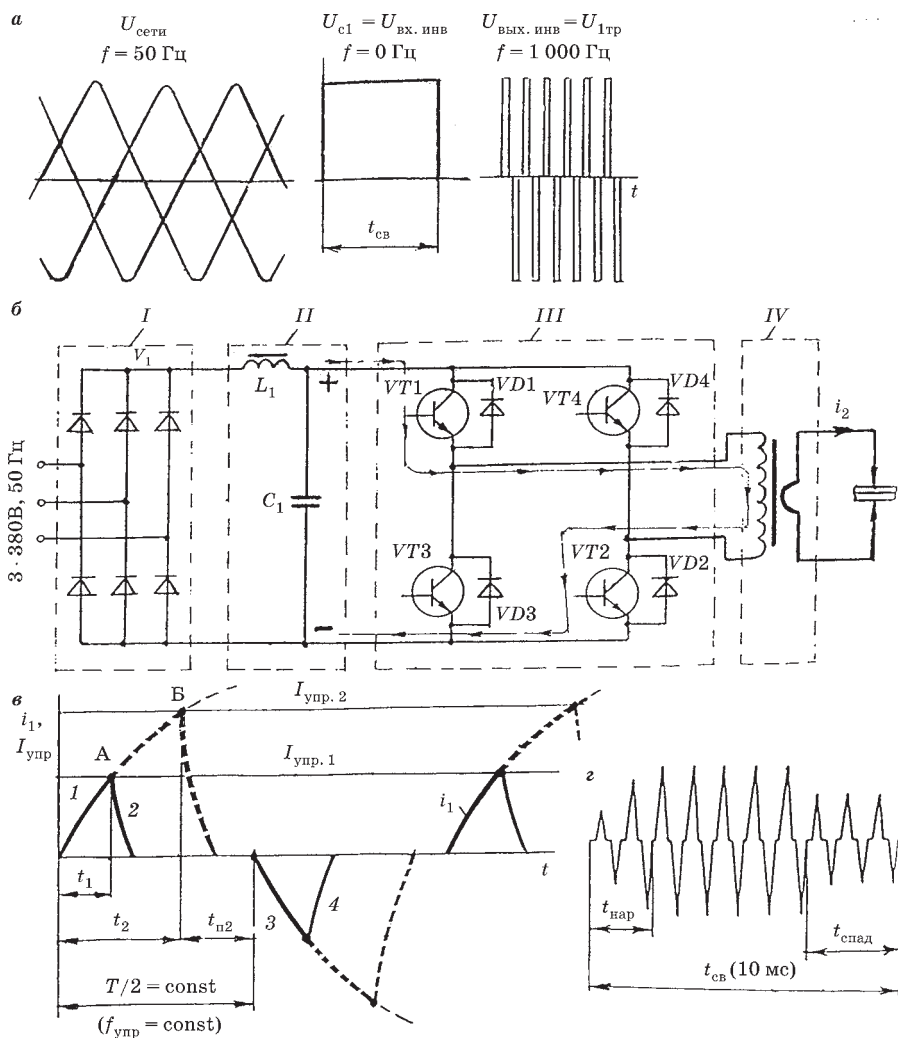


Рис. 13.13

Электрическая схема контактной машины переменного тока повышенной частоты (б), характер напряжения на различных участках схемы (а), принцип регулирования сварочного тока (в) и вариант сформированного импульса (г):

I — трехфазный двухполупериодный выпрямитель; *II* — низкочастотный фильтр; *III* — транзисторный инвертор; *IV* — сварочный понижающий трансформатор.

Для сварки целесообразно использовать только первую основную полуволну колебательного процесса. Поэтому в рассматриваемую схему параллельно первичной обмотке сварочного трансформатора включен шунтирующий диод $VD_{ш}$, прерывающий колебательный процесс (рис. 13.14б).

Форма импульсов сварочного тока при изменении регулируемых параметров: емкости батареи конденсаторов C и напряжения зарядки батареи U_c — показана на рисунке 13.14в.

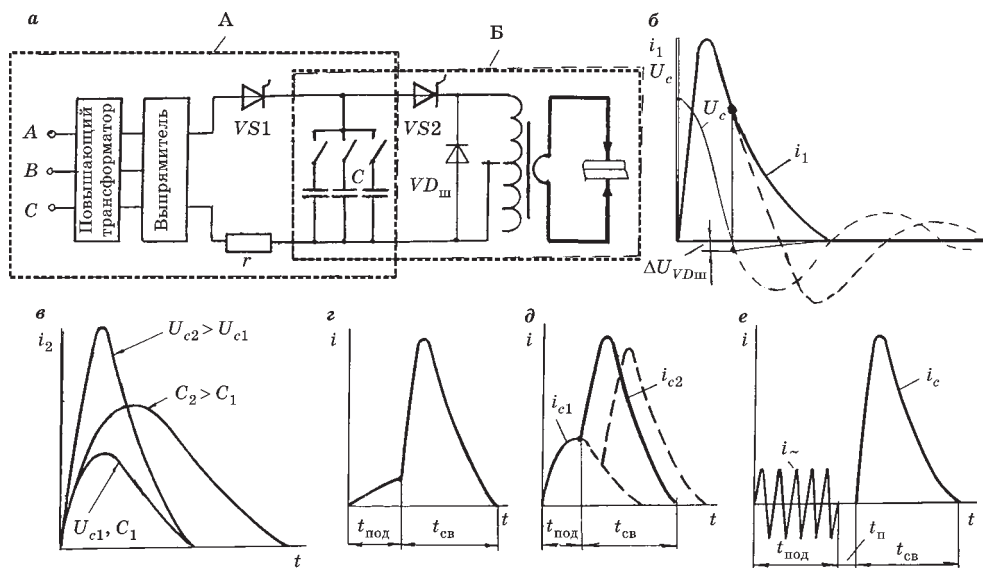


Рис. 13.14

Электрическая схема конденсаторной машины (а), организация импульса тока в разрядном контуре при наличии шунтирующего диода (б), форма импульсов сварочного тока при изменении регулируемых параметров C , U_c (в), формирование начальной стадии импульса сварочного тока за счет кратковременного включения дросселя в разрядную цепь (г), использование дополнительной батареи конденсаторов (д) и отдельного источника переменного тока (е)

Конденсаторные источники сварочного тока решают две задачи. В приборостроительной промышленности — технологическую задачу получения импульсов сварочного тока 1...5 кА длительностью 1...10 мс со стабильным вложением энергии при каждой сварке. Последнее обеспечивается стабилизацией энергии, накапливаемой в батарее конденсаторов определенной емкости при ее зарядке напряжением с точностью $\pm 1,5\%$.

Более радикальным способом получения высокого и стабильного качества сварных соединений при значительных уровнях возмущающих факторов (колебания начальных контактных сопротивлений, изменения усилия сжатия, изменения диаметра рабочих поверхностей электрода и др.) является использование автоматического регулятора параметров процесса сварки.

В машиностроении решается другая задача — энергетическая, связанная со снижением мощности, потребляемой из сети, в первую очередь при точечной сварке крупногабаритных узлов из алюминиевых сплавов и сварке по рельефам большой протяженности. Например, при вылете 1,5 м машина с конденсаторным источником тока осуществляет сварку деталей из алюминиевых сплавов толщиной 2,5 + 2,5 мм при потребляемой зарядной мощности 75 кВт·А. Низкочастотная машина при этих условиях потребляет мощность 300 кВт·А, а машина переменного тока — 1500 кВт·А.

Одним из существенных недостатков конденсаторного источника тока, кроме высокого напряжения зарядки до 1000 В, и большой стоимости, и громоздкости батареи конденсаторов, является крутой фронт нарастания тока. Такое

резкое нарастание тока в сочетании с большим и нестабильным начальным сопротивлением свариваемых деталей приводит к выплескам.

Это вызывает необходимость предусматривать в конденсаторных машинах для сварки деталей малых толщин (менее 0,5 мм) начальную стадию сварочного тока обеспечивающую подогрев зоны соединения с целью стабилизации контактного сопротивления между свариваемыми деталями. Такой подогрев можно осуществить за счет временного включения в разрядную цепь дросселя (рис. 13.14а), за счет предварительного импульса тока, организованного от дополнительной батареи конденсаторов (рис. 13.14б), а также переменным током, пропускаемым через детали перед основным сварочным импульсом (рис. 13.14в).

Характерными особенностями конденсаторных контактных машин являются:

- возможность получения кратковременных регулируемых по амплитуде и длительности импульсов сварочного тока;
- стабильное дозирование энергии на каждую сварку;
- малая потребляемая (зарядная) мощность из сети;
- крутой фронт нарастания импульса сварочного тока;
- высокое напряжение батареи конденсаторов (до 1000 В);
- громоздкость и высокая стоимость батареи конденсаторов.

13.6. АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ КОНТАКТНЫХ МАШИН

Основной задачей аппаратуры управления контактных машин является организация и стабильное воспроизведение циклограммы процесса, обеспечивающей качественное сварное соединение. В задачи аппаратуры могут быть также включены: пассивный и активный контроль наиболее значимых параметров процесса, анализ и диагностирование качества сварки и надежности работы оборудования, управление вспомогательными операциями.

Выполнение этих задач требует быстродействия, точности работы и эксплуатационной надежности, что стало возможным с использованием аппаратуры, изготовленной на базе однокристалльных микро-ЭВМ и микропроцессорной техники.

Например, регуляторы типа РКС-16 обеспечивают (рис. 13.15):

- управление тиристорным контактором и тремя электропневматическими клапанами;
- дискретный отсчет и регулирование длительности всех позиций сварочного цикла;
- возможность организации одно- многоимпульсного сварочного цикла;
- регулирование величины сварочного тока в диапазоне от 25 до 95% полного значения;
- модуляцию (плавное нарастание) основного сварочного тока длительностью 0...99 периодов;
- компенсацию изменения сварочного тока при колебаниях напряжения сети от +5 до -10%;
- автоматическую стабилизацию установленного при вводе сварочного тока;
- диапазон задаваемых значений $\cos\varphi$ 0,3...0,8;
- сохранение в энергонезависимой памяти до 16 программ.

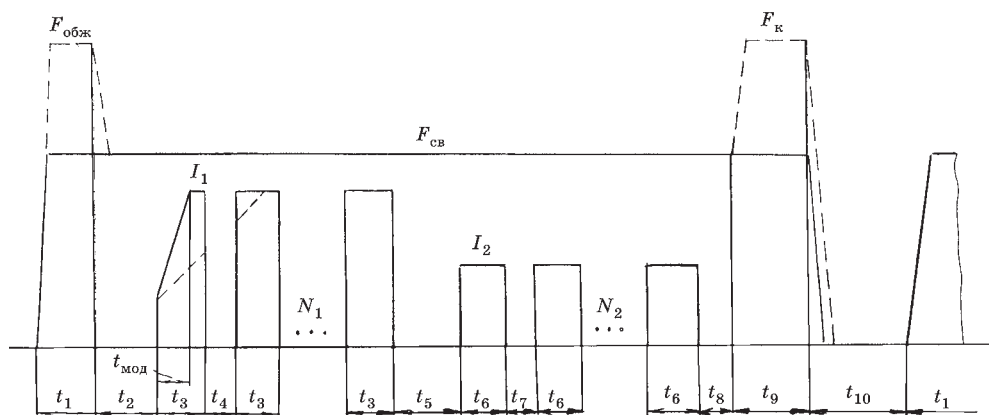


Рис. 13.15

Циклограмма работы микропроцессорного регулятора точечной сварки типа РКС-16 по усилию сжатия и структуре импульса сварочного тока

Все величины параметров в регуляторах вводятся по номеру, который соответствует индексу в обозначении параметра и фиксируются на индикаторе регулятора, куда также выводятся измеренные среднедействующие значения сварочного тока и напряжения сети.

Обеспечение высокого и стабильного качества требует контроля и анализа параметров процесса сварки ($I_{св}$, $t_{св}$, $F_{св}$). Такой контроль может быть осуществлен с помощью измерителя параметров точечной сварки МИКС-3, регистратора технологических параметров процесса РКД-04-01 и др. приборов.

Многофункциональный измеритель параметров МИКС-3 оснащен датчиками тока («пояс Роговского») и силы (измерительная скоба с тензометрическим мостом). Имеет двухстрочный алфавитно-цифровой дисплей, на котором все измеряемые параметры фиксируются одновременно. Кроме действующего и максимального значения сварочного тока в пределах 2...250 кА и силы сжатия — 100...2500 даН с относительной погрешностью не более 2,5%, прибор позволяет измерять: время протекания сварочного тока 1...2000 мс; время нарастания тока (для машин постоянного тока, конденсаторных и низкочастотных), время нарастания усилия сжатия, среднедействующее значение вторичного напряжения, активное и индуктивное сопротивление вторичного контура, величину $\cos\phi$ машины.

Для измерения статической силы сжатия между электродами до 5000 даН можно воспользоваться пружинными или гидравлическими динамометрами.

Регистратор РКД-04-01 функционально аналогичен многоканальному цифровому осциллографу и отличается от последнего тем, что функции регистрации и визуализации разделены между собственно регистратором и персональным компьютером. Регистратор, оснащенный набором необходимых датчиков (тока, напряжения, силы сжатия, перемещения, скорости...), осуществляет запись параметров на магнитном диске. На персональном компьютере можно просмотреть характер изменения этих параметров и произвести необходимые вычисления.

Регистратор может служить средством 100%-ного контроля параметров сварки. В этом случае основные параметры процесса обрабатываются непосредственно регистратором и сравниваются с граничными условиями. При выходе параметров за допустимые значения, выполняются те или иные действия — фиксация номера сварочной операции, отметка сварного соединения или его отсортировка, блокирование дальнейшей работы машины.

При отсутствии специализированных приборов для регистрации импульса сварочного тока в первичной цепи контактной машины и измерения его величины и длительности, можно воспользоваться электронным запоминающим осциллографом. При этом в первичную цепь сварочного трансформатора включают бесконтактный датчик тока (например, фирмы LEM), сигнал с которого подается на вход осциллографа (рис. 13.16а).

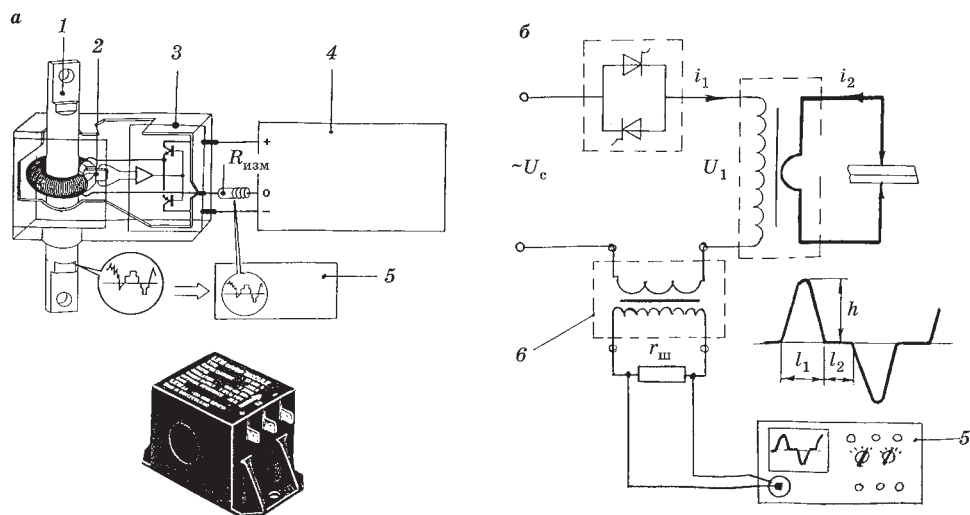


Рис. 13.16

Схема регистрации электрического тока в первичной цепи контактной машины с использованием запоминающего осциллографа и бесконтактного датчика тока (а) или измерительного трансформатора тока (б):

1 — участок первичной цепи контактной машины; 2 — датчик холла; 3 — электронный компенсирующий блок; 4 — источник питания; 5 — электронный запоминающий осциллограф; 6 — измерительный трансформатор тока.

Бесконтактный датчик фирмы LEM работает по принципу компенсации магнитного потока, создаваемого измеряемым током и фиксируемого в зазоре магнитопровода датчиком Холла. При этом ток в компенсирующей цепи (выведенный с резистора $r_{изм}$ на экран осциллографа) в точности отображает поведение измеряемого тока любой формы (переменного, постоянного, импульсного) в выбранном масштабе.

При отсутствии бесконтактных датчиков для регистрации переменного тока в первичной цепи сварочного трансформатора, можно воспользоваться измерительным трансформатором тока (УТТ-5, УТТ-6) с зашунтированным выходом (рис. 13.16б).

Действующее значение измеряемого переменного тока определяется из выражения

$$I_1 = \frac{hMK_{т.т}}{r_{ш}\sqrt{2}} \sqrt{\frac{l_1}{l_1 + l_2}},$$

где h — величина максимального (амплитудного) отклонения луча на экране осциллографа, в делениях шкалы; M — масштаб отображения, в вольтах на деление шкалы; $K_{т.т}$ — коэффициент трансформации измерительного трансформатора тока; $r_{ш}$ — сопротивление шунта, Ом; l_1 — длительность протекания тока в пределах полупериода, в делениях шкалы; l_2 — длительность участка в пределах полупериода с нулевым значением тока, в делениях шкалы.

При пересчете измеренного первичного тока I_1 на сварочный ток во вторичной цепи I_2 , необходимо учитывать ток холостого хода сварочного трансформатора:

$$I_2 \approx 0,95I_1 \frac{U_1}{U_{20}}.$$

13.7. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УНИВЕРСАЛЬНЫХ И СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ КОНТАКТНЫХ МАШИН

Выбор оборудования для сварки конкретного узла осуществляется с учетом:

- способа сварки;
- размеров и формы свариваемых деталей — выбирается вылет, раствор, а также конструктивная схема машины (прессового, радиального типа, подвесная и т. п.);
- параметров режима сварки — максимального усилия сжатия, величины сварочного тока, скорости сварки, оплавления, осадки и желательной нагрузочной характеристике;
- экономических и энергетических соображений;
- организации производства — необходимости специализированного оборудования, оснастки, транспортных средств или возможности модернизации внешнего контура и электродных узлов серийной контактной машины.

Машины точечной сварки. Наибольшее распространение в машиностроении получили *стационарные точечные машины переменного тока прессового типа* (с прямолинейным перемещением верхнего электрода, рисунок 13.17а, б). Машины этого типа отличаются простотой конструкции, высокой производительностью, относительно низкой стоимостью и выпускаются на сварочные токи 5...40 кА. Они позволяют сваривать листовые конструкции из низкоуглеродистой стали толщиной от 0,5 до 8 мм; низколегированной, нержавеющей стали и титановых сплавов до 5 мм, алюминиевых сплавов и латуни до 1,5 мм, а также крестообразные соединения из прутков арматуры диаметром от 2 до 40 мм.

Для сварки ответственных изделий из легированных сталей, алюминиевых, жаропрочных и титановых сплавов в авиационной и других отраслях промышленности применяются *точечные машины постоянного тока, низкочастотные и конденсаторные*. Они имеют технологичную, регулируемую в широком

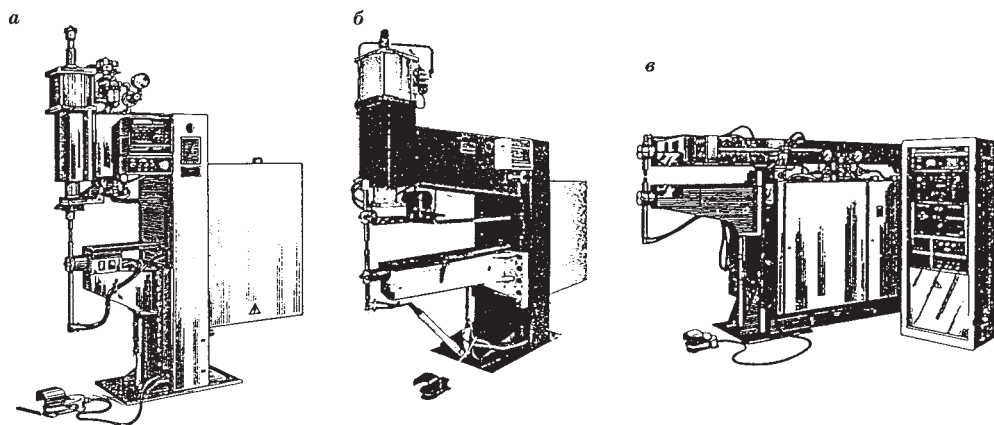


Рис. 13.17

Точечные машины прессового типа с нормальным (а) и увеличенным — 1200 мм (б) вылетом; машины радиального типа (в)

диапазоне форму униполярного импульса сварочного тока, крутопадающую нагрузочную характеристику, способствующую эффекту саморегулирования сварочного тока, и высокие динамические характеристики привода сварочной силы. Машины этой группы потребляют из сети значительно меньшую мощность (например, конденсаторные машины — в 6...8 раз) по сравнению с машинами переменного тока при сварке аналогичных деталей, но имеют более высокую стоимость.

Маломощные точечные конденсаторные машины, а также машины повышенной частоты (в том числе с выпрямлением тока во вторичном контуре) используются в приборостроении для сварки деталей из черных и цветных металлов толщиной от 0,05 до 1,0 мм. Машины этого типа отличаются высокой стабильностью воспроизведения электрических и механических параметров процесса; возможностью получения управляемых кратковременных импульсов сварочного тока.

Кроме машин прессового типа, для точечной сварки выпускаются машины *радиального типа переменного и постоянного тока* (рис. 13.17в). В радиальных машинах верхний электрод и токоподводящие элементы внешнего контура закреплены на качающемся коромысле с приводом сжатия, расположенном внутри корпуса. Такая компоновка позволяет освободить пространство над верхним электродом для размещения деталей свариваемых изделий сложной конфигурации. По своей конструкции радиальные машины проще, экономичнее в изготовлении, менее металлоемки, чем аналогичные машины прессового типа. В таблице 13.3 приведены технологические характеристики некоторых отечественных машин.

Для точечной сварки крупногабаритных изделий в труднодоступных местах, а также объемных листовых и стержневых конструкций, вместо стационарных применяются *подвесные контактные машины*. Они оснащены источниками переменного тока промышленной частоты (МТП-1110, МТП-1111) или источниками постоянного тока (МТВП-1207), в том числе, с промежуточным звеном повышенной частоты (МТВП-1201). Сварочный трансформатор и отдельно расположенные клещи (рис. 13.18а), связанные с трансформатором

Технологические характеристики машин для точечной сварки переменного тока промышленной частоты прессового (МТ) и радиального (МТР) типа, постоянного тока (МТВ), низкочастотных (МТН) и конденсаторных (МТК)

Марка машины	Вылет, мм	Раствор, мм	Толщина свариваемого металла (одной детали), мм				Диаметр свариваемой арматуры, мм
			Низкоуглеродистые стали	Коррозионно-стойкие стали, титановые сплавы	Алюминиевые сплавы	Латунь, бронза	
МТ-1928-5	500	180...350	0,5...5,0	0,3...1,5	До 0,6	—	4...12
МТ-2103-1	1200	200.300	0,8...6,0	0,8...4,0	0,5...0,8	0,8...1,0	4...16
МТ-3001	500	240...390	0,5...7,0	1,0...3,0	0,5...1,0	0,5...1,2	6...18
МТ-4024*	500	150...300	0,5...8,0	0,5...5,0	0,3...1,7	0,5...1,5	—
МТ-4224-1	500	180...280	1,0...10,0	2,0...4,0	1,0...2,0	—	8...36
МТР-1601**	200...500	130	0,5...3,5	0,5	—	—	2...12
МТР-1801	280...500	150...330	0,5...5,0	0,5...1,0	—	—	2...16
МТВ-4801	500	180...300	0,5...5,0	0,2...2,5	0,3...1,5	0,3...1,8	—
МТВР-4801	800...1200	140...390	0,3...3,0	0,3...2,5	0,3...2,5	0,3...2,5	—
МТН-7501	800	200...350	0,6...6,0	0,4...4,0	0,5...3,0	0,5...3,0	—
МТК-2001	200	150	0,1...1,0	0,1...0,5	0,05...0,5	0,05...0,5	—
МТК-5502	600	170...300	0,5...1,5	0,3...1,2	0,3...1,5	0,5...1,5	—
МТК-8501	1500	500	0,5...2,0	0,3...2,0	0,5...2,5	0,5...2,5	—

*С изменяемой в процессе сварки силой сжатия.

**С педальным (пружинным) приводом сжатия (остальные машины с пневматическим приводом).

гибким водоохлаждаемым кабелем, подвешены на специальном балансировочном коромысле, обеспечивающем необходимую маневренность сварочного инструмента (клещей). На рисунке 13.18б приведены некоторые типы клещей с пневматическим и гидравлическим приводом сжатия, с прямолинейным и радиальным ходом электродов.

Выпускаются клещи со встроенным сварочным трансформатором (рис. 13.18в), позволяющие избавиться от дорогих, массивных, с малым сроком службы силовых сварочных кабелей и резко уменьшить сопротивление вторичного контура. Если при этом воспользоваться источником сварочного тока с промежуточным звеном повышенной частоты и выпрямлением тока во вторичной цепи, то можно значительно уменьшить массу и габариты сварочного трансформатора и получить компактную конструкцию клещей для применения в составе робототехнического комплекса (рис. 13.19).

Разработана конструкция клещей, обеспечивающих точечную сварку через промежуточную прокладку-ленту, расположенную между рабочей поверхностью электрода и свариваемой деталью и перемещающуюся на шаг после каждой сварки. Это позволяет обеспечить бесследную точечную сварку, выполнить качественную сварку оцинкованных сталей и деталей, значительно отличающихся по толщине, а также сварку деталей из алюминиевых сплавов с меньшими энергетическими затратами.

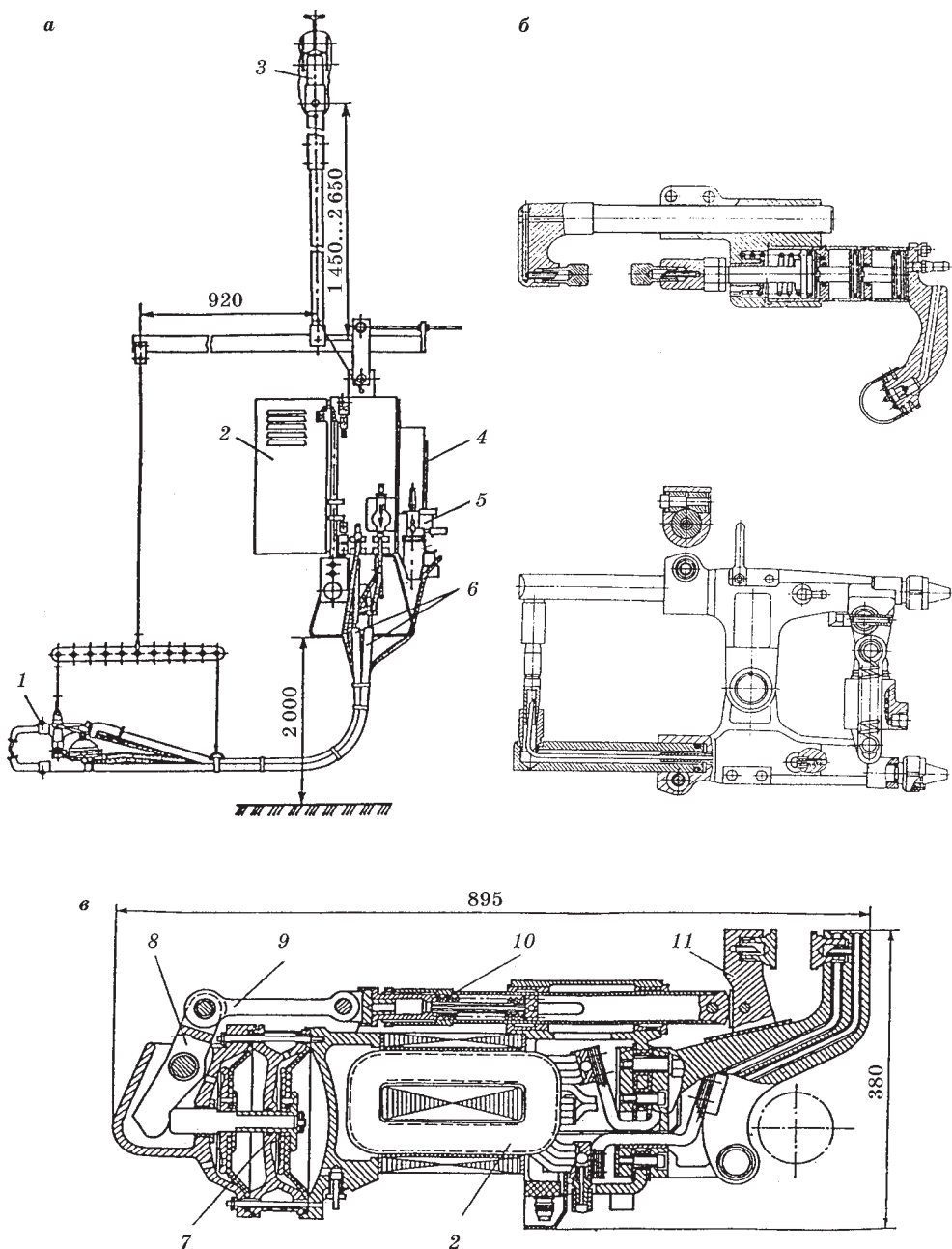


Рис. 13.18

Подвесная точечная машина МТП-1110 (а), разновидности используемых клещей прессового и радиального типа (б), сварочные клещи со встроенным трансформатором (в):
 1 — сварочные клещи; 2 — сварочный трансформатор; 3 — шарнирная подвеска; 4 — аппаратура управления; 5 — пневмоаппаратура; 6 — водоохлаждаемые токоведущие кабели; 7 — двухдиафрагменный привод сжатия электродов; 8 — рычаг; 9 — серьга; 10 — пружина возврата; 11 — подвижной электрододержатель.

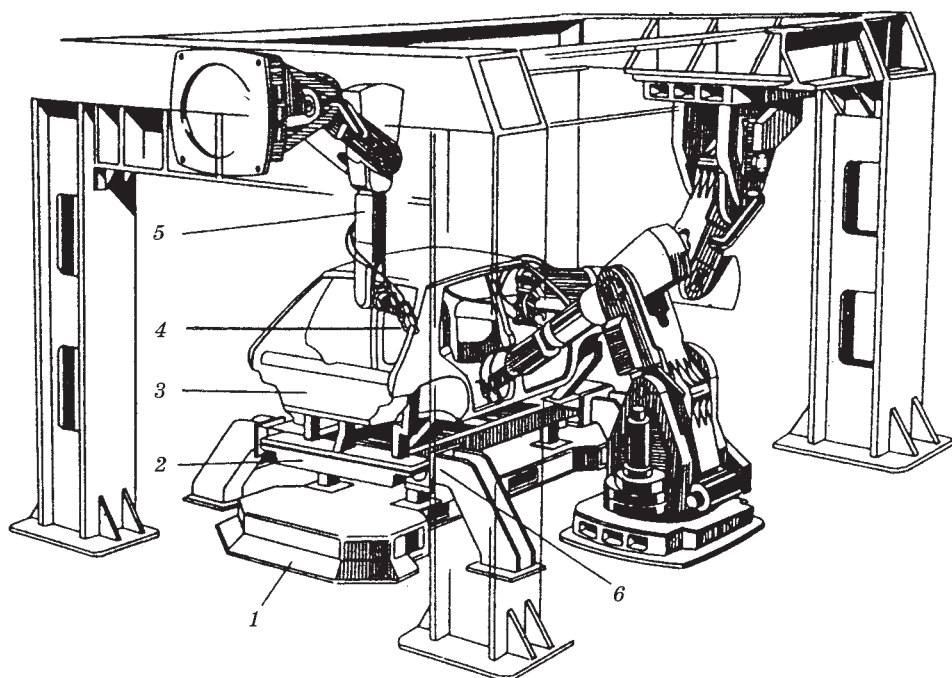


Рис. 13.19

Роботизированный участок точечной сварки кузовов легкового автомобиля с гибкой транспортной системой:

1 — транспортная тележка; 2 — сборочный стапель-спутник; 3 — свариваемый кузов; 4 — сварочные клещи; 5 — робот; 6 — фиксатор спутника.

Специальные точечные машины (линии, комплексы) предназначены для сварки определенных или группы однотипных изделий применительно к массовому и крупносерийному производству. Большое внимание при проектировании специального оборудования для контактной сварки уделяется механизации и автоматизации вспомогательных операций, составляющих 85–90% трудоемкости изготовления изделия.

Конструктивное оформление специального оборудования определяется формой и габаритами свариваемых деталей, числом и расположением точек, используемыми транспортными средствами, требуемой производительностью. Основой компоновки многоэлектродной машины является ее электросварочная часть, состоящая из типовых унифицированных сварочных трансформаторов, приводов усилия сжатия с электрододержателями и электродами, токоведущих элементов, связывающих выводные колодки сварочных трансформаторов с электрододержателями.

На рисунке 13.20а показана простейшая схема компоновки многоэлектродной машины для сварки плоских деталей с двусторонним токоподводом: на неподвижных рамах 1 и 3 установлены сварочные трансформаторы 2 и 4 и приводы сварочного усилия 5 и 6 (механизмы перемещения и фиксации свариваемых деталей не показаны).

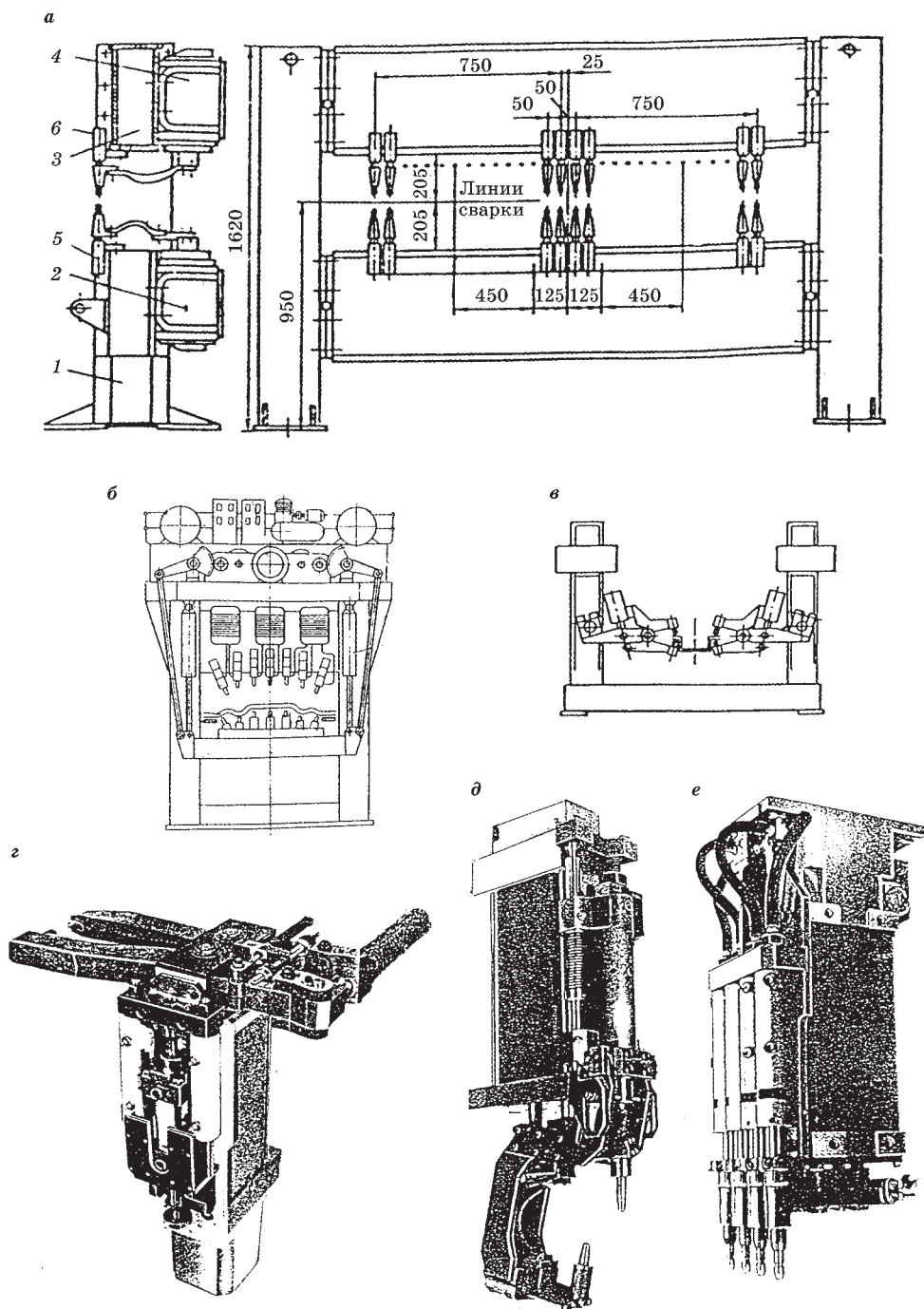


Рис. 13.20

Варианты компоновки многоэлектродных точечных машин (а, б, в) и конструкции отдельных сварочных модулей (г, д, е)

Возможна конструктивная схема с односторонним токоподводом (рис. 13.20б) и использованием сварочных клещей и сварочных модулей различной конструкции (рис. 13.20г, д, е). В многоэлектродных машинах широко используются малогабаритные унифицированные сварочные трансформаторы, особенностью конструкции которых является вытянутая форма с малым поперечным сечением и наличие двух отдельных вторичных витков, позволяющих питать одновременно две пары электродов (рис. 13.20е).

На базе многоэлектродных точечных машин выпускаются машины и линии для сварки широкой гаммы типоразмеров плоских сеток и объемных стержневых каркасов. Например, машина МТМ-289 обеспечивает сварку арматурных сеток шириной до 2000 мм из прутков диаметров 3...8 мм, производит автоматическую подачу и правку поперечных и продольных прутков из бухт, резку поперечных прутков.

Машины рельефной сварки. Компоновка и конструкция основных узлов машин для рельефной сварки аналогичны точечным машинам прессового типа. Отличия заключаются в конструкции внешнего контура, который заканчивается двумя плитами с Т-образными пазами для установки специальных электродов (см. рис. 13.6) или сборочно-сварочных приспособлений; повышенном требовании к жесткости корпуса и ограничении вылета (расстояние от корпуса машины до центра плиты обычно не более 300 мм); наличии устройств, обеспечивающих регулирование параллельности электродных плит и обеспечивающих установочный ход нижней плиты до 200 мм.

Образование соединения при рельефной сварке сопровождается значительным перемещением верхнего электрода, вызванного смятием рельефов. При этом из-за инерционности массивных подвижных частей привода сжатия, их трения в направляющих и возможного заклинивания, а также залипания манжет поршня, возможно резкое снижение усилия сжатия в начале процесса сварки, приводящее к выплескам и ухудшению качества соединений. В связи с этим в рельефных машинах необходимо предусматривать минимальную массу подвижных частей, опоры качения в направляющих, пружинную развязку между штоком и ползуном. Целесообразно также уменьшение скорости смятия рельефов за счет плавного нарастания сварочного тока в течение времени $0,2...0,3 t_{св}$.

Для сварки деталей из низкоуглеродистых сталей толщиной более 0,5 мм, в том числе закладных деталей арматуры железобетона, могут быть использованы *рельефные машины переменного тока* (МР 4501, МР 8010), позволяющие одновременно сваривать до 8 рельефов при толщине низкоуглеродистой стали 1 мм и 2 рельефа — при толщине 4 мм (рис. 13.21а).

Сварка изделий ответственного назначения из коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов выполняется на мощных *рельефных машинах постоянного тока и низкочастотных*, например МРН-24009. Использование машин постоянного тока позволяет снизить потребляемую мощность, улучшить распределение тока при групповой рельефной сварке, обеспечить сварку деталей малых толщин.

Рельефные конденсаторные машины, а также специальные полуавтоматические установки используются для сварки изделий относительно малых

толщин (до 0,5 мм) по развитым разомкнутым или кольцевым (прямоугольным) рельефам, например, при герметизации корпусов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Значительная протяженность рельефов (100 мм и более) требует больших токов — до 150 кА. Эта задача успешно решается конденсаторными источниками тока при длительной потребляемой из сети мощности, не превышающей 50 кВ·А. Двухимпульсный разряд батареи конденсаторов обеспечивает широкое регулирование формы сварочного импульса (см. рис. 13.14) и в совокупности с проковкой повышает стабильность и качество соединений. Машины оснащены скафандром для создания контролируемой атмосферы в зоне сварки, а полуавтоматы — поворотными столами для автоматизации перемещения герметизируемых корпусов от позиции их загрузки в специальные электродные устройства к позициям сварки и выгрузки.

Для Т-образной сварки шпилек и штифтов из сталей и цветных металлов диаметром 3...8 мм к поверхности листов толщиной не менее 0,5 мм в заводских и монтажных условиях выпускается компактное оборудование для ударно-конденсаторной (конденсаторно-искровой) сварки. Такие установки имеют батарею конденсаторов 66 000 мкФ, напряжение зарядки 50...200 В, время сварки 1...3 мс.

Машины шовной сварки. Машины шовной сварки применяются при соединении деталей внахлестку герметичным швом (в редких случаях используются при сварке отдельными точками с определенным шагом и высокой производительностью). Шовные машины различаются:

- по расположению роликов относительно корпуса машины — для поперечной и продольной сварки;
- по характеру пропускания тока — с непрерывным и прерывистым пропусканием тока;
- по способу передачи крутящего момента на сварочные ролики — с осевым приводом одного или обоих роликов, с приводом обоих роликов с помощью шарошек, с вращением роликов за счет трения о движущееся изделие или о неподвижное изделие при поступательном перемещении каретки с роликом;
- по характеру перемещения свариваемых деталей — с непрерывным и прерывистым (шаговым) перемещением.

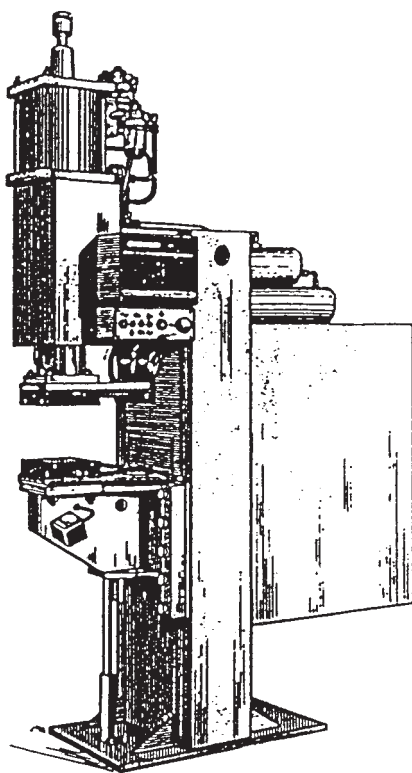


Рис. 13.21
Машина для рельефной сварки переменного тока промышленной частоты

К шовным машинам общего назначения относятся *машины переменного тока* (рис. 13.22) для продольной и поперечной сварки деталей из нержавеющей и низкоуглеродистых сталей без покрытий толщиной 0,2...3,0 мм. По компоновке и конструкции большинства узлов шовные машины общего назначения аналогичны точечным. Отличительной особенностью шовных машин является достаточно сложное электродное устройство, обеспечивающее подвод к дисковым электродам сварочного тока, вращающего момента и силы сжатия.

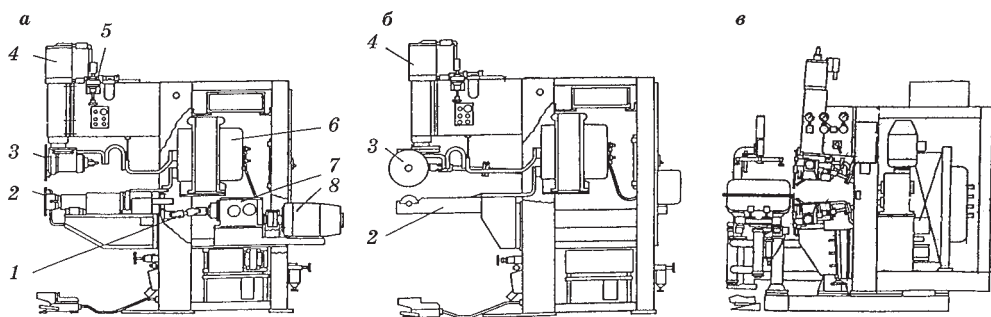


Рис. 13.22

Шовные машины переменного тока промышленной частоты для поперечной (а) и продольной (б) сварки; специализированная машина для сварки бензобаков (в):

1 — шарнирный вал; 2, 3 — электродные узлы; 4 — пневмопривод; 5 — пневмоаппаратура; 6 — сварочный трансформатор; 7 — редуктор; 8 — привод вращения роликов.

Для сварки ответственных крупногабаритных изделий из легких сплавов, латуни, нержавеющей и жаропрочных сталей, титановых сплавов (толщиной от 0,5 до 3,0 мм) предназначены *шовные машины постоянного тока*.

Шовные машины специального назначения разработаны для ряда конкретных изделий серийного и массового производства. Для сварки сильфонных и мембранных узлов, а также других ответственных соединений малых (0,05...0,5 мм) и неравных толщин из легированных сталей и цветных сплавов используются машины с различными источниками питания: переменного тока повышенной частоты, конденсаторные, низкочастотные и постоянного тока с промежуточным звеном повышенной частоты.

Для сварки топливных баков из оцинкованных и оцинкованных сталей выпускают шовные машины для поперечной сварки переменным током и низкочастотные с наклонным (под углом до 6°) расположением электродов для удобства сварки по отбортовке и приводом вращения обоих электродов с помощью шарошек, обеспечивающих постоянство скорости сварки вне зависимости от диаметра электродов (рис. 13.22в). Машины оснащены приспособлением, которое обеспечивает установку и закрепление бака, точное перемещение отбортовки вдоль сварочных электродов, поворот бака и переключение режимов сварки на радиусных участках, осуществление перекрытия шва. Предусмотрены дополнительные устройства для зачистки рабочей поверхности сварочных электродов от налипающего покрытия. Марки и технологические характеристики ряда отечественных машин для шовной сварки приведены в таблице 13.4.

Технологические характеристики машин для шовной сварки переменного тока промышленной частоты (МШ), низкочастотных (МШН), и постоянного тока (МШВ)

Марка машины	Вылет, мм	Раствор, мм	Скорость сварки, м/мин	Для продольной или поперечной сварки	Толщина свариваемого металла (одной детали), мм			
					Низкоуглеродистые стали	Коррозионно-стойкие стали, титановые сплавы	Алюминиевые сплавы	Оцинкованная, оцинкованная сталь
МШ-2207	780	105	0,2...4,3	Попереч.	0,2...2,0	0,3...1,5	—	—
МШ-2202-1	800	85	0,4...4,8	Попереч. и прод.	0,5...1,8	0,5...1,5	—	—
МШ-2502	800	105	0,2...4,0	Прод.	0,5...3,0	0,3...1,8	—	—
МШ-3213	840	50	0,3...3,5	Попереч.	0,5...3,0	0,3...2,5	—	0,5...2,0
МШН-3702	200	120	0,1...1,5	Попереч.	—	0,05...0,8	0,1...0,5	0,05...0,6
МШН-8501	600	95	0,5...5,0	Попереч.	1,0...3,0	1,0...2,0	0,5...2,0	0,8...2,0
МШВ-3001	1500	160	0,2...8,0	Попереч. и прод.	—	0,3...3,0	0,3...1,0	—
МШВ-7502	1200	150	0,2...8,0	Попереч. и прод.	0,5...3,0	0,5...3,0	0,3...2,0	—

Машины стыковой сварки. Машины стыковой контактной сварки предназначены для соединения заготовок из низкоуглеродистой и легированной стали, титана, цветных металлов и их сплавов сечением от десятых долей до десятков тысяч квадратных миллиметров. Свариваемые заготовки могут иметь разную конфигурацию: стержни, проволока, трубы, полосы, ленты, прокатный профиль (в т. ч. рельсы), заготовки сложной формы, свариваемые одновременно в нескольких местах суммарной площадью до 50 тыс. мм².

Оборудование для стыковой сварки подразделяется:

- по методу сварки — машины для стыковой сварки сопротивлением (МСС) и машины для стыковой сварки оплавлением (МСО), в том числе непрерывным оплавлением, импульсным оплавлением, оплавлением с предварительным подогревом;
- по виду источника сварочного тока;
- по назначению — общего назначения и специальные;
- по степени автоматизации — машины с ручным управлением, полуавтоматические, автоматические;
- по способу установки — стационарные, передвижные (подвесные).

Универсальные машины для стыковой сварки сопротивлением обеспечивают сварку заготовок диаметром 0,5...10 мм из черных и цветных металлов. Машины оснащены пружинными приводами зажатия и осадки деталей с усилием до 100 даН. Команда на отключение тока вырабатывается путевым выключателем по величине перемещения подвижного зажима. Предусмотрена возможность термообработки зоны сварки при ручном управлении и визуальном контроле температуры нагрева. Имеется устройство для обрезки концов проволоки перед сваркой.

Для сварки заготовок из закаливающих сталей диаметром 3...10 мм, а также прутков диаметром до 24 мм и шин сечением 5×25 мм из меди, алюминия, никрома стыковые машины оборудованы двумя приводами осадки: один обеспечивает сжатие деталей на этапе нагрева; другой выполняет принудительную деформацию металла на этапе осадки с подрезкой грата (сварочные губки оснащены вставками из жаропрочной стали). Обеспечивается термообработка (отжиг или изотермический отпуск) в автоматическом режиме с управлением по температуре нагрева с помощью пирометра.

Универсальные машины для стыковой сварки оплавлением обеспечивают сварку заготовок из низкоуглеродистой стали сечением до 2000 мм², заготовок инструмента из быстрорежущей стали с конструкционной, а также цветных металлов и сплавов сечением до 300 мм². При этом используется оборудование как с ручным (рычажным) механизмом перемещения подвижной плиты при оплавлении и осадке, так и с электромеханическим кулачковым приводом. В машинах такого типа (например, МСО-606) обеспечивается полная автоматизация процесса сварки с предварительным подогревом, стабилизацией сварочного тока и контролем длительности осадки под током. Для обеспечения непрерывной работы технологических линий в металлургическом производстве, трубоэлектросварочных, профилегибочных и других агрегатов применяются специальные стыковые машины для сварки лент методом непрерывного оплавления.

Стыковая сварка прямых труб и змеевиков диаметром 25...85 мм из перлитных и аустенитных сталей выполняется как непрерывным оплавлением, так и с предварительным подогревом по жесткой временной программе. Используются машины (например, МСО-1205) с электромеханическим кулачковым приводом оплавления и пневматическим приводом осадки. Промысловые и технологические трубопроводы диаметром 57...530 мм с толщиной стенки до 16 мм из низкоуглеродистых и низколегированных сталей свариваются в полевых и стационарных условиях машинами клещевого типа (рис. 13.23).

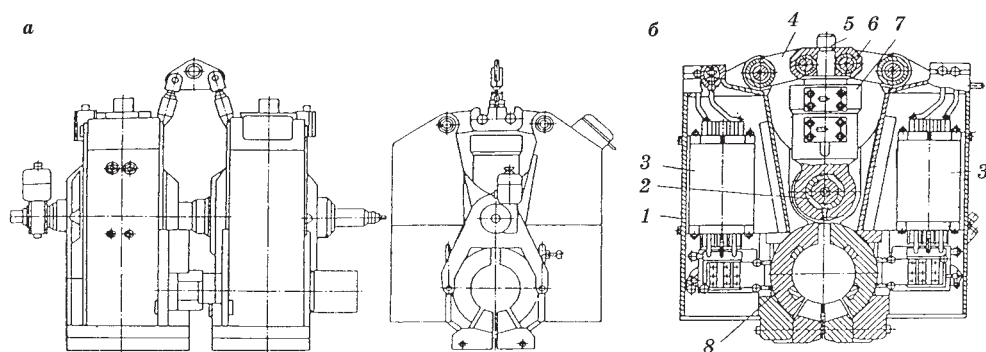


Рис. 13.23

Машина МСО-5001 для стыковой контактной сварки труб диаметром 114...325 мм в полевых и заводских условиях (а) и разрез ее клещевого зажима (б):

1 — коромысловая щека; 2 — центральная ось; 3 — сварочные трансформаторы; 4 — серьга; 5 — шток; 6 — траверса; 7 — гидроцилиндр механизма зажатия трубы; 8 — сварочные губки (электроды).

Для сварки *магистральных трубопроводов* диаметром 720...1420 мм разработаны уникальные внутритрубные машины типа К-830, К-800, К-700-1. Машины оснащены гидравлическими приводами всех механизмов. Непрерывное оплавление выполняется с коррекцией программируемой скорости по току оплавления. Применение кольцевых трансформаторов с большим числом параллельных токоведущих ветвей во вторичном контуре позволяет снизить его сопротивление до 5...12 мкОм и осуществить электропитание машины от дизельной электростанции мощностью до 1000 кВт.

Стыковая сварка рельсов, а также проката различного профиля сечением до 18 000 мм² в стационарных условиях методом непрерывного или импульсного оплавления осуществляется на машинах проходного типа (рис. 13.24) с гидравлическими приводами зажатия, оплавления и осадки. Вторичный контур имеет две параллельные ветви с токоподводом на верхние и нижние сварочные губки от двух трансформаторов, расположенных внутри неподвижной колонны. Машины оснащены устройствами для снятия грата непосредственно после сварки и компьютерными системами управления, контроля и регистрации параметров режима.

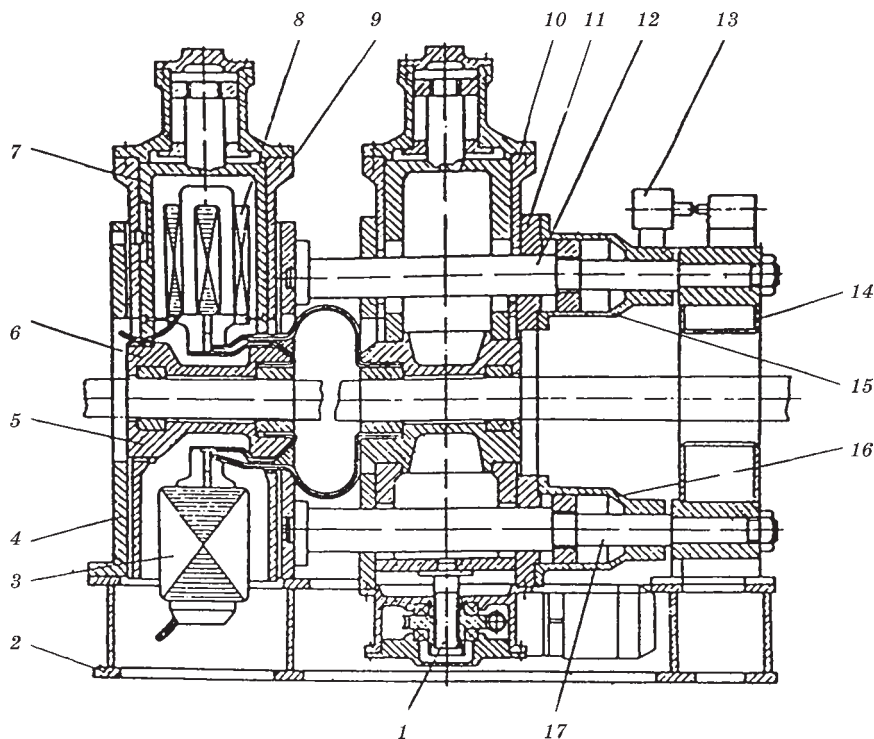


Рис. 13.24

Конструктивная схема стационарной машины для сварки рельсов:

1 — механизм вертикальной центровки; 2 — станина; 3, 8 — сварочные трансформаторы; 4 — неподвижная колонна; 5, 6 — зажимные башмаки со сварочными губками (электродами); 7 — полый поршень; 9, 10 — гидроцилиндры зажима рельсов; 11 — подвижная колонна; 12, 17 — штоки гидроцилиндров осадки; 13 — гидроследящее устройство; 14 — неподвижная стойка станины; 15, 16 — гидроцилиндр осадки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие функциональные узлы входят в состав контактной машины для точечной (шовной, стыковой) сварки?
2. Какие составляющие входят в полное сопротивление контактной машины?
3. Что такое $\cos\phi$ контактной машины? От чего зависит его величина?
4. Как оценивается степень полезного использования мощности потребляемой контактной машиной?
5. От каких факторов зависит индуктивное сопротивление контактной машины?
6. Какое влияние (на что) оказывает наличие ферромагнитной массы свариваемой детали и сборочных приспособлений во внешнем контуре контактной машины?
7. Что вы понимаете под термином «Режим работы контактной машины (ПВ%)», «Номинальный длительный вторичный ток ($I_{2ном. дл}$)»?
8. Внешняя и нагрузочная характеристики контактной машины. Их зависимость от соотношения сопротивления нагрузки (r_{Σ}) и сопротивления контактной машины при коротком замыкании (z_m).
9. Каковы условия проявления саморегулирования или стабилизации сварочного тока в контактной машине (на примере анализа внешних характеристик)?
10. Условия работы электродов контактных машин.
11. Способы регулирования сварочного тока в контактных машинах; какими устройствами они осуществляются; преимущества и недостатки этих способов?
12. Отличительные особенности асинхронных и синхронных контакторов.
13. Что такое фазовое регулирование сварочного тока (регулирование сварочного тока фазовой отсечкой сетевого напряжения)? Какие положительные и отрицательные факторы сопровождают эти способы регулирования сварочного тока?
14. Перечислите известные вам виды источников сварочного тока контактных машин. Дайте им сравнительную характеристику: формы импульсов тока, преимущества и недостатки, область применения.
15. Что дает включение в состав источников сварочного тока контактной машины звена повышенной частоты?

Часть III

**СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ
СВАРКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ДАВЛЕНИЯ**

14.1. ХОЛОДНАЯ СВАРКА

14.1.1. СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА

Холодная сварка — метод получения неразъемного соединения высокопластичных металлов в результате направленной глубокой пластической деформации материала, которая обеспечивает в зоне контакта заготовок механическое разрушение и эвакуацию оксидных пленок и создает условия для возникновения металлических связей. Жировые и масляные загрязнения со свариваемых поверхностей удаляются предварительно путем специальной обработки. Дополнительный нагрев заготовок от постороннего источника тепла не производится. Необходимая пластическая деформация создается специальным инструментом.

Технологические возможности холодной сварки ограничены, что связано с требованием к пластичности металла.

Холодной сваркой чаще всего соединяют алюминий, медь, алюминий с медью, а также серебро, свинец, золото, никель, кадмий, цинк, олово, титан, ниобий. Возможность получения качественных соединений разноименных материалов, в том числе плохо сваривающихся традиционными методами, использующими нагрев, делает холодную сварку перспективной.

Диапазоны размеров сечений и толщин, холодная сварка которых освоена к настоящему времени, достаточно широки. Холодная сварка позволяет получать соединения различных типов при разнообразном конструктивном их оформлении.

При сварке наблюдается интенсивный наклеп металла, поэтому прочность сварного соединения, выполненного без нарушений технологического режима, как правило, выше, чем у основного материала. Отсутствие значительного нагрева практически исключает возможность появления хрупких интерметаллидных прослоек (например, при сварке алюминия с медью), обеспечивая тем самым высокую пластичность и прочность соединения. Сварной шов не загрязняется посторонними примесями, обладает высокой химической однородностью и поэтому имеет высокие показатели по коррозионной стойкости и стабильности электрического переходного сопротивления.

Простота подготовки деталей к сварке, легкость контроля параметров режима, отсутствие вспомогательных материалов, газо- и тепловыделений, возможность дистанционного управления и быстрота процесса делают холод-

ную сварку удобной для автоматизации, не требуют высокой квалификации сварщика-оператора. Удельные затраты энергии на сварку приблизительно на порядок меньше, чем при сварке плавлением.

Однако сварка каждого конкретного изделия требует индивидуальной конструкции инструмента. Необходимо исключать загрязнение подготовленных к сварке поверхностей. При выполнении нахлесточных соединений на изделии остаются глубокие вмятины — следы от инструмента.

14.1.2. ТЕХНОЛОГИЯ ХОЛОДНОЙ СВАРКИ

Для получения различных типов соединений разработан ряд схем холодной сварки.

Сварка *нахлесточных соединений* может осуществляться в отдельных точках (рис. 14.1а, б), непрерывным и прерывистым швом (рис. 14.1в, г), по замкнутому контуру (рис. 14.1з, е), по плоскости — холодная сварка прокаткой (рис. 14.1е). Наибольшее практическое применение нашли схема точечной

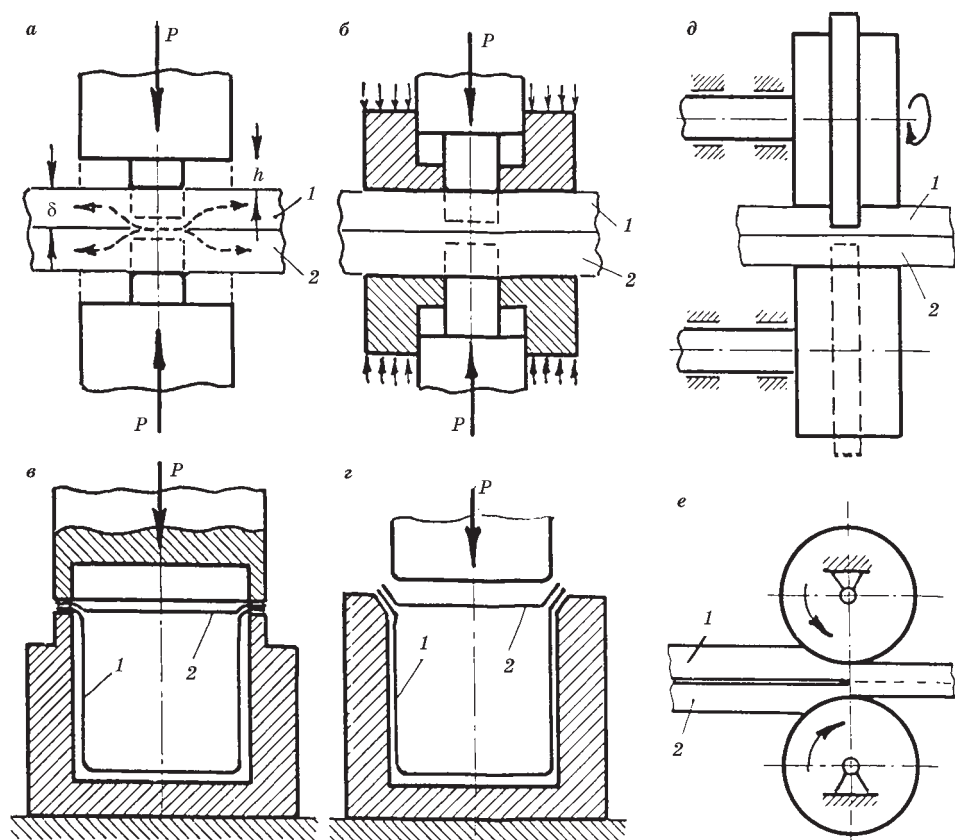


Рис. 14.1

Схемы холодной сварки нахлесточных соединений:

а — пуансонами с заплечиками; б — с предварительным зажатием заготовок; в и г — по контуру; д — шовная; е — прокаткой; 1 и 2 — свариваемые заготовки.

сварки пуансонами с «заплевками» и схема с предварительным зажатием заготовок. В последнем случае получаемое соединение имеет хорошо развитую периферийную зону, обеспечивающую повышенную механическую прочность.

Возможна сварка с односторонним и двусторонним деформированием заготовок.

Нахлесточные соединения заготовок могут сваривать в одной или нескольких точках одновременно или последовательно. Конфигурация сечения пуансона — чаще всего в виде круга или прямоугольника. Точечной сваркой соединяют листы толщиной 0,08...15 мм. Причем сварка без предварительного зажатия заготовок возможна при толщине не более 4 мм из-за значительного коробления деталей. Удаётся получать соединения разнотолщинных заготовок.

Нашла применение шовная сварка по контуру, которая позволяет получать непрерывный герметичный шов. Методом прокатки (обжатием между цилиндрическими валками) выполняют нахлесточные соединения листов и пластин по большой площади.

При одновременном воздействии на заготовки нормального сжимающего и тангенциального усилия, вызывающего небольшое (6...10 мм) относительное смещение соединяемых поверхностей, облегчается процесс пластической деформации металла в приповерхностных слоях. Это позволяет получать нахлесточные соединения при существенно меньших значениях напряжений сжатия и избежать вмятин от инструмента. Такая схема получила название «сварка сдвигом».

Схемы сварки *стыковых соединений* (рис. 14.2) отличаются между собой способами передачи усилия осадка к месту сварки и ограничением объема материала, участвующего в пластической деформации. Степень пластической деформации для основной схемы (рис. 14.2а), получившей широкое применение, оценивается по начальному вылету заготовки из зажима, выраженному в долях размера свариваемого сечения (диаметра или толщины свариваемой детали).

Особой разновидностью стыковой сварки является «холодная пайка», позволяющая соединять относительно малопластичные материалы, не сваривающиеся холодной сваркой (например, низкоуглеродистую сталь). В этом случае соединение образуется за счет деформируемой промежуточной вставки из высокопластичного металла (отожженная медь или алюминий) между торцами свариваемых деталей.

Возможны стыковые соединения проволоки и прутков круглого сечения диаметром от 0,8 до 30 мм, полос прямоугольного сечения с максимальной площадью для меди до 1000 мм² (100×10 мм) и для меди с алюминием до 1500 мм². Стыковые соединения успешно выполняют также на заготовках более сложного профиля с сохранением в месте сварки исходной конфигурации свариваемых элементов. Возможно получение стыковых соединений на трубах при определенном соотношении толщины стенки и диаметра.

Технология сварки включает следующие операции:

- подготовка соединяемых поверхностей;
- сборка;
- сварка;
- удаление облоя (в случае стыковой сварки).

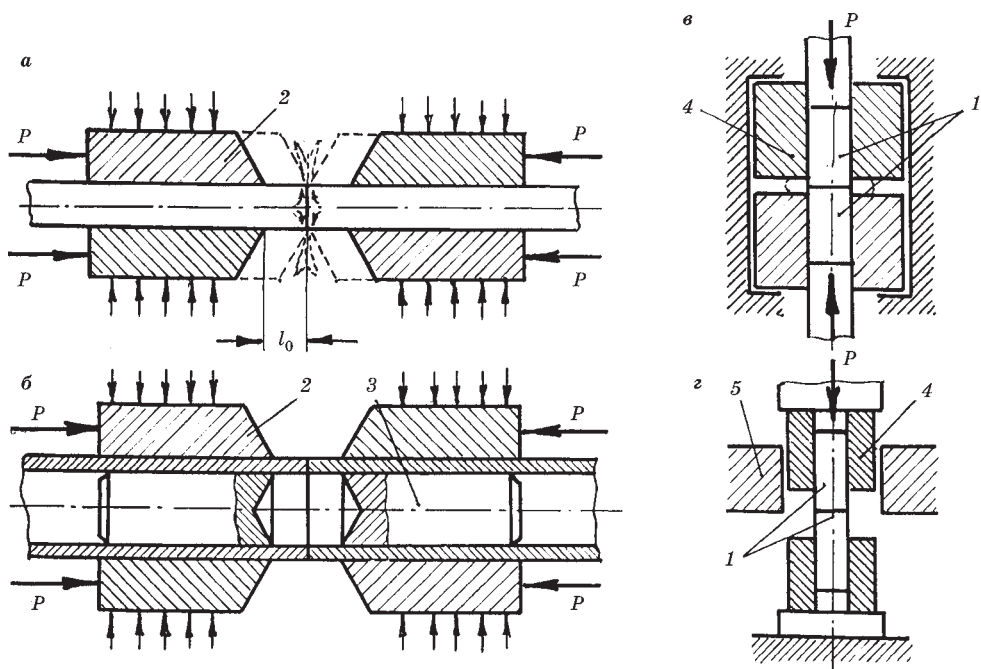


Рис. 14.2

Схемы холодной сварки стыковых соединений:

а — сплошного сечения; *б* — трубчатых элементов; *в* — «выпрессовыванием»; *г* — в направляющих втулках; 1 — свариваемые заготовки; 2 — зажимные губки; 3 — пробка; 4 — втулка; 5 — направляющие.

Целью предварительной *подготовки поверхностей* является удаление жировых и масляных загрязнений. Это достигается одним из следующих способов: механической зачисткой стальными вращающимися щетками при сварке внахлестку и при стыковой сварке больших сечений после механической резки; прокаливанием заготовок при температуре 350...400°C при свободном доступе воздуха (для алюминиевых деталей); покрытием поверхности тонким (6...10 мкм) слоем гальванического никеля, хрома или оксидной пленкой (при сварке медных заготовок); обрезкой конца заготовки перпендикулярно ее оси чистым инструментом, обеспечивающим удаление загрязнений вместе с частью срезаемого металла (широко применяется при стыковой сварке заготовок относительно небольших сечений); многократной осадкой концов заготовок при стыковой сварке.

Выбор *параметров режима сварки* зависит от типа соединения, свариваемого материала, схемы процесса, формы инструмента, размеров заготовок, требований к сварному соединению и изделию в целом.

Основным параметром процесса является величина пластической деформации, которая зависит от схемы сварки.

Для нахлесточных соединений величина пластической деформации K оценивается по глубине h погружения рабочей части инструмента, отнесенной к толщине s свариваемого металла.

Величина пластической деформации выбирается исходя из необходимой прочности сварного соединения и может быть в пределах 70...90% от толщины свариваемых заготовок. При односторонней сварке разнотолщинных заготовок глубина вдавливания должна составлять 55...60% от их суммарной толщины. При соединении разнотолщинных металлов деформирование производят со стороны более тонкого на глубину $(1,5...2)s$ при сварке алюминия с алюминием и $(2...3)s$ при плакировании тонкой медью алюминия.

Вторым параметром процесса является сила, передаваемая на инструмент. При сварке нахлесточных соединений силу сжатия назначают с учетом того, что качественное соединение в случае использования пуансов с заплечиками (см. рис. 14.1а) получается после обжатия материала опорной частью инструмента в периферийной зоне сварной точки. Однако это не должно вызывать появления значительных вмятин в металле. Площадь торца рабочего выступа пуансона всегда много меньше площади опорной части, и поэтому усилие, рассчитанное на обжатие точки, достаточно для обеспечения проникновения рабочего выступа в металл. Для сварки алюминия давление на опорной части инструмента составляет порядка 110...120 МПа. При сварке по схеме с предварительным зажатием заготовок сила рассчитывается по необходимому давлению на металл со стороны торца пуансона в конце процесса деформации. Для алюминия эти давления лежат в пределах 400...1500 МПа. С увеличением толщины свариваемого металла значения необходимого давления возрастают.

Давление на прижиме составляет 30...50 МПа и передается на заготовки до или одновременно с началом движения пуансона. Скорость деформирования, как и для случая стыковой сварки, значения не имеет.

При сварке встык величину пластической деформации определяют по начальному вылету заготовки l_0 . Диапазон значений l_0 может быть достаточно широк. При назначении этого параметра основным условием является получение симметричной деформации металла без потери устойчивости конца заготовки. С ростом толщины (диаметра) свариваемого сечения абсолютное значение вылета растет, но относительное, выраженное в долях толщины или диаметра заготовки d , падает. При сварке заготовок прямоугольного сечения требуется, при прочих равных условиях, несколько большее значение l_0 , чем для круглых. Для алюминия этот параметр меняется от $0,5d$ (для $d = 30$ мм) до $1,0d$ (для $d = 1...3$ мм). Для меди $l_0 = (0,75...1,1) d$ соответственно для диаметров от 20 до 2 мм. При сварке разноименных материалов (например, меди с алюминием) начальный вылет более твердого и менее пластичного металла больше. Если нельзя достичь необходимую степень пластической деформации за одну осадку из-за потери устойчивости конца заготовки, то может быть применено двукратное деформирование (сварка меди).

Второй параметр режима — давление p на свариваемый материал — определяется пластичностью металла, величиной l_0 и конструкцией зажимного устройства. Рабочая сила в процессе осадки все время возрастает. Чтобы довести процесс до конца, она должна назначаться исходя из необходимого конечного давления.

Удаление облоя производится, как правило, одновременно с завершением процесса деформации специальным режущим выступом на инструменте.

14.1.3. ОБОРУДОВАНИЕ

Различают оборудование для стыковой, точечной и шовной сварки. В зависимости от конструктивного оформления инструмента на точечных машинах можно получать одно- и многоточечные соединения, а также соединения по контуру. За исключением специализированных установок, машины для холодной сварки могут перестраиваться на изготовление различных деталей путем замены инструмента (вкладышей, пуансонов, штампов).

В состав установок для стыковой сварки в общем случае входят:

- зажимные устройства (губки, сменные вкладыши);
- механизм замыкания губок для создания необходимой силы трения;
- направляющие для перемещения губок с заготовками;
- механизм осадки;
- аппаратура управления;
- вспомогательные механизмы и приспособления для удаления грата и отрезки концов заготовок.

Зажимные устройства выполняют разъемными из двух частей. По плоскости разъема предусматривается гарантированный зазор. Участок внутренней поверхности зажимной губки, контактирующий непосредственно со свариваемыми заготовками, должен соответствовать конфигурации сечения свариваемой детали. Длина вылета заготовки устанавливается по линейке или с помощью концевого упора. Для предотвращения проскальзывания заготовок и уменьшения необходимой силы зажатия на поверхности губок делается насечка. Для удаления облоя края зажимов заостряются под углом 60°.

Механизм замыкания губок для создания необходимой силы трения в зажимах должен гарантировать отсутствие проскальзывания заготовок в процессе сварки. Наилучшие условия создаются при использовании запорных механизмов, обеспечивающих жесткое кинематическое замыкание губок (кулачковые и клиновые запорные механизмы). При использовании таких устройств и при наличии насечки на губках сила зажатия может составлять порядка 45% от силы осадки. Сила зажатия при сварке малых сечений создается вручную, при сварке больших сечений — с помощью пневмо- и гидроцилиндров.

В большинстве случаев перемещение зажимных устройств осуществляется по *цилиндрическим направляющим*.

Механизм осадки обеспечивает необходимую сварочную силу с помощью пневмо-, гидро- или пневмогидропривода. Скорость деформирования выбирается из условия обеспечения необходимой производительности. При сварке малых сечений клещами необходимое усилие создается сварщиком.

Аппаратура управления работой гидро- и пневмоцилиндров обеспечивает с помощью кранов либо золотниковых устройств с электромагнитным приводом, команда на срабатывание которых может подаваться вручную или от программного устройства в зависимости от степени автоматизации процесса сварки. Контроль силы осадки — по манометру.

Машины обычно комплектуются *отрезными механизмами* (ножами) для подготовки заготовок к сварке с пневматическим или гидравлическим приводом. При работе с ручными клещами для этих целей имеются специальные кусачки.

В состав установок для сварки нахлесточных соединений в общем случае входят:

- сварочный инструмент (пуансоны, ролики);
- прижимные плиты с механизмами зажатия и размыкания;
- направляющие для перемещения инструмента;
- пресс для создания рабочей силы;
- аппаратура управления;
- вспомогательные механизмы для зачистки свариваемых поверхностей.

Сварочный инструмент для конкретных изделий в большинстве случаев имеет индивидуальную форму и конструкцию, которая зависит от выбранной схемы процесса и может представлять собою пуансоны различных конфигураций для точечной и контурной сварки или ролики для шовной сварки. Наиболее рациональное сечение рабочего выступа инструмента для точечной сварки — круг или прямоугольник. Последний предпочтительнее для сварки нагретого алюминия, меди и меди с алюминием. Диаметр d рабочего выступа или его ширина b в случае прямоугольной формы должны составлять $(1...3)s$, где s — толщина свариваемого металла. Большее значение относится к более тонкому металлу. Соотношение сторон в сечении прямоугольного инструмента порядка $1 : 5$. При сварке разноименных металлов d или b следует брать обратно пропорционально их твердости. Площадь торца рабочего выступа в случае использования ступенчатого пуансона составляет не менее 15% от его опорной части.

При шовной сварке диаметр ролика d_p должен составлять порядка $50s$, ширина рабочего выступа $b = (1...1,5)s$; ширина опорной части $(2...3)b$.

Прижимные плиты при сварке по схеме с предварительным зажатием заготовок должны иметь площадь в $15...25$ раз больше рабочей площади торца пуансона, который выполняется в виде самостоятельной детали. Предварительное зажатие заготовок в монтажных условиях может осуществляться между плитами, имеющими калиброванные отверстия для пуансонов. Для извлечения инструмента из свариваемой заготовки по высоте рабочей части пуансона предусматривается уклон $4...6^\circ$.

Для сварки нахлесточных соединений по схеме с предварительным зажатием применяют специальные штампы, конструкция которых обеспечивает деформирование металла пуансонами только после зажатия заготовок между плитами.

14.2. СВАРКА ВЗРЫВОМ

14.2.1. СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА

Сварка взрывом — метод соединения материалов в твердом состоянии, использующий энергию разложения взрывчатого вещества (ВВ). Под воздействием взрыва заготовки с большими скоростями соударяются. Между свариваемыми поверхностями создается подобие кумулятивной струи, уносящей с них загрязнения, а высокие сжимающие давления обеспечивают физический контакт и возникновение металлических связей в результате пластического деформирования и активации атомов в приповерхностных слоях.

При сварке по одной из основных схем, получившей название «угловой», заготовки располагаются под некоторым углом α по отношению друг к другу так, что их края, обращенные к вершине угла, образуют зазор Δ (рис. 14.3). Взрывчатое вещество укладывается ровным слоем на поверхность метаемой пластины 1. Инициирование взрыва производят детонатором 5, при подрыве которого вдоль слоя ВВ распространяется плоская детонационная волна с постоянной скоростью, исчисляемой несколькими тысячами метров в секунду. С такой же скоростью перемещается область с высоким давлением продуктов разложения ВВ, значения которого в начальный момент могут достигать нескольких сот атмосфер. Давление за фронтом снимается волнами разрежения, распространяющимися во все стороны и сообщающими каждому элементарному объему метаемой заготовки импульс силы, направленной по нормали к ее начальному положению. Под давлением продуктов детонации эти элементарные объемы получают ускорение. Часть же пластины, находящейся впереди фронта, в силу инерции сохраняет свое начальное положение. Движение части пластины вызывает ее деформацию (перегиб) вблизи фронта, а при соударении со второй заготовкой наблюдается второй перегиб. Образующийся между свариваемыми поверхностями угол встречи γ зависит от соотношения значений скоростей детонации D и движения пластины V_n . Считают, что в вершине этого угла возникает подобие кумулятивной струи (направленный струйный выброс материала тонких поверхностных слоев заготовок), обеспечивающий очистку соединяемых поверхностей. В «точке» (линии) соударения возникают огромные контактные напряжения, значительно превосходящие предел текучести свариваемого материала при статическом нагружении. Эти напряжения вызывают пластическое деформирование поверхностных слоев соединяемых заготовок. Наличие тангенциальной составляющей скорости V_t создает в зоне соударения сдвиговые перемещения, составляющие доли миллиметра. Таким образом, при соударении заготовок создаются условия для очистки поверхности, активации атомов в приповерхностных слоях и образования физического контакта за счет пластической деформации.

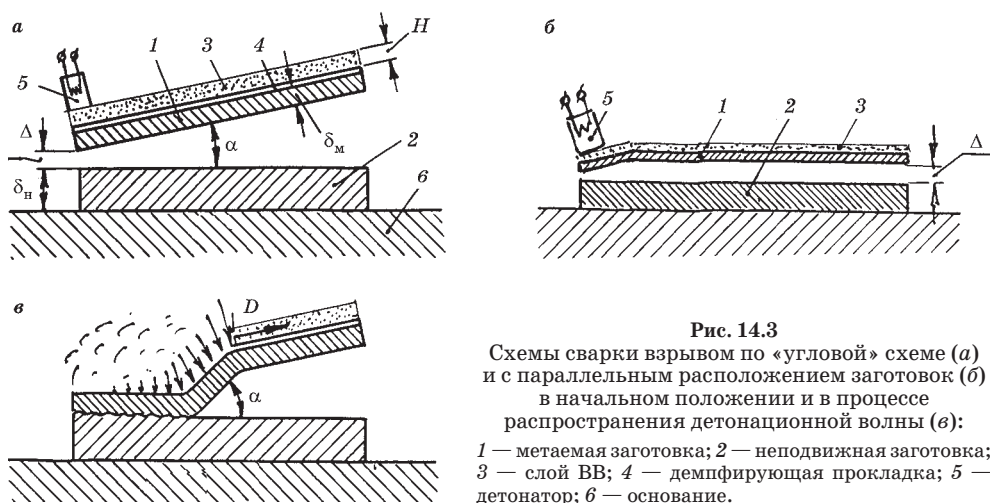


Рис. 14.3

Схемы сварки взрывом по «угловой» схеме (а) и с параллельным расположением заготовок (б) в начальном положении и в процессе распространения детонационной волны (в): 1 — метаемая заготовка; 2 — неподвижная заготовка; 3 — слой ВВ; 4 — демпфирующая прокладка; 5 — детонатор; 6 — основание.

В большинстве случаев сварки наблюдается волнообразность зоны соединения, связанная, по-видимому, с неустойчивостью кумулятивной струи. Процесс сварки может сопровождаться механическим перемешиванием материала заготовок. В соединении иногда наблюдаются включения литого металла. Микрорентгеновский анализ зоны сварки говорит о бездиффузионном ее характере. Под воздействием высоких давлений и резко локализованном повышении температуры в зоне сварки может наблюдаться появление новых фаз. Вблизи границ раздела имеет место неширокая (10...100 мкм) зона наклепанного металла. Поверхностный слой метаемой заготовки, испытывающий непосредственное воздействие продуктов детонации, также подвергается наклепу. Неравномерная деформация заготовок приводит к появлению остаточных напряжений.

Волнообразный характер границы, наклеп металла и механическое перемешивание обуславливают повышенную прочность соединения.

К настоящему времени освоена сварка достаточно широкой номенклатуры материалов как в однородном, так и в разнородных сочетаниях: низкоуглеродистые, коррозионностойкие, инструментальные стали, медь, алюминий, титан и сплавы на их основе, ванадий, ниобий, серебро, молибден, вольфрам, цирконий, магний, цинк и др. Наибольший интерес представляет соединение разнородных материалов. Метод позволяет получать двух- и многослойные соединения, композиционные материалы.

Основным типом соединения является нахлесточное, выполняемое по плоскости, цилиндрическим, конусным поверхностям (рис. 14.4) и криволинейным с большим радиусом кривизны. Возможно получение нахлесточного соединения на части площади заготовки (рис. 14.4а, б). Принципиальных ограничений по верхнему пределу размера свариваемой площади заготовок нет. Уже освоена сварка внахлестку листов площадью около 30 м².

Соотношения свариваемых толщин могут колебаться в широких пределах. Максимальная толщина неподвижной заготовки не лимитируется. Толщина метаемой заготовки обычно лежит в диапазоне 0,3...19 мм. Максимальная ее толщина определяется пластичностью материала. Минимальная толщина метаемой заготовки ограничивается нарушением устойчивости процесса детонации ВВ при уменьшении толщины заряда ниже определенного значения. Получаемые сварные соединения равнопрочны основному металлу. В них отсутствуют какие-либо загрязнения. Неравномерная деформация приводит к возникновению значительных остаточных напряжений, которые могут быть устранены последующей термической обработкой. Этим методом можно соединять детали в труднодоступных для обычных сварочных аппаратов зонах, в различных пространственных положениях, во внутренних полостях изделий и при необходимости сварки одновременно в нескольких местах. Удастся получать изделия с внутренними полостями и каналами, предварительно созданными на неподвижной заготовке и заполненными каким-либо легко удаляемым веществом (воск, парафин, свинец и т. п.). Производительность метода высока и определяется, по существу, только затратами времени на подготовительные операции. Сам процесс длится миллисекунды. При внедрении метода не требуется больших единовременных затрат. Однако следует иметь в виду

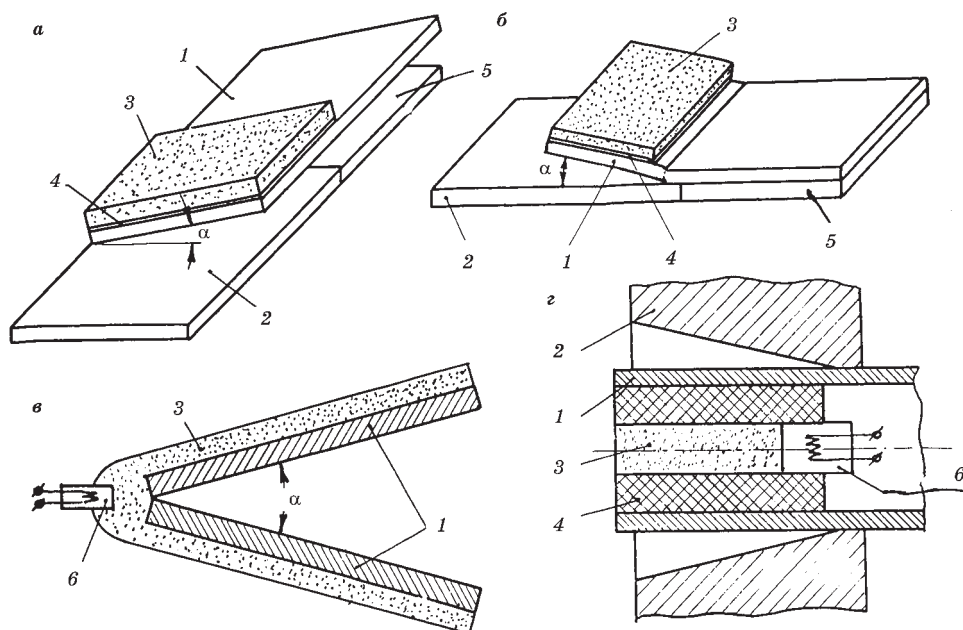


Рис. 14.4

Разновидности «угловой» схемы сварки:

а — плоских заготовок с ограниченной площадью соединения; *б* — с отгибом конца метаемой заготовки; *в* — труб с трубными досками; *г* — с двусторонним расположением заряда; 1 — металл; 2 — неподвижная заготовка; 3 — ВВ; 4 — демпфирующий слой; 5 — подкладка, 6 — детонатор.

необходимость строгого соблюдения техники безопасности при работе с ВВ. При использовании навесок взрывчатого вещества больше нескольких килограммов сварку приходится вести на полигоне. Требуется защита персонала от звуковой волны. При сварке в помещениях с использованием специальных вакуумных камер необходима вентиляция для удаления вредных газов.

14.2.2. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

Процесс сварки при конкретных заготовках и массе ВВ определяется тремя физическими параметрами:

- скоростью D распространения фронта детонации;
- скоростью V_n , развиваемой метаемой пластиной к моменту соударения заготовок;
- углом γ , образованным соединяемыми поверхностями в «точке» соударения.

Скорость детонации D зависит от природы взрывчатого вещества, его плотности, влажности, дисперсности частиц, геометрических размеров заряда. Для конкретной марки ВВ эти параметры известны. При взрыве начальное давление p_0 в продуктах разложения не зависит от массы ВВ. Количество взрывчатого вещества влияет на длительность импульса силы и тем самым на получаемую метаемой пластиной кинетическую энергию.

Максимально возможная скорость движения заготовки V_{max} для данных условий метания (масса заготовки и ВВ, скорость детонации) может быть

определена по формуле, полученной на основании расчетов и экспериментального уточнения:

$$V_{\max} = 1,2D \sqrt{\frac{1 + \frac{32}{37}r - 1}{1 + \frac{32}{37}r + 1}}, \quad (14.1)$$

где $r = \frac{H \cdot \rho_{\text{ВВ}}}{\delta_{\text{м}} \cdot \rho_{\text{м}}}$; H — толщина слоя ВВ; $\rho_{\text{ВВ}}$ — плотность ВВ; $\delta_{\text{м}}$ — толщина метаемой заготовки; $\rho_{\text{м}}$ — плотность материала заготовки.

Реальная скорость $V_{\text{н}}$ соударения заготовок при сварке, кроме указанных параметров, будет зависеть также и от зазора Δ . При $\Delta = 0$ движения заготовки нет и скорость равна 0 при любом значении H , поэтому сварка не происходит. Чрезмерное увеличение скорости с ростом H и при большом зазоре Δ вызывает образование сколов и трещин в соединяемых заготовках. Таким образом, существует оптимальное значение Δ .

Поскольку контролировать физические параметры процесса трудно, то для выбранной марки ВВ принимают *технологические параметры*: толщину H слоя ВВ, начальный зазор Δ и угол α . Рассмотренная «угловая схема» и ее технологические варианты (рис. 14.4в, г) применяются для сварки плоских и цилиндрических заготовок. Необходимый начальный угол α может задаваться начальным пространственным расположением заготовок, механической обработкой или местным прогибом свариваемого участка одной из деталей. Однако при использовании этой схемы не обеспечивается постоянство условий сварки на всей площади соединения. Поэтому применение ее ограничено относительно небольшими размерами заготовок. В силу этого схема с параллельным расположением свариваемых поверхностей (см. рис. 14.3в) получила большее распространение. За исключением небольшого по протяженности отогнутого участка, условия сварки всюду одинаковые. Это позволяет применять ее для заготовок любых размеров. При использовании варианта с выступающим краем метаемой пластины, необходимый начальный угол формируется в ходе процесса.

При изготовлении изделий методом сварки взрывом выполняют следующие операции:

- механическую обработку соединяемых поверхностей;
- травление заготовок (с последующей мойкой и сушкой);
- обезжиривание свариваемых поверхностей;
- сборку заготовок, укладку ВВ и установку детонатора;
- производство взрыва (собственно сварка);
- термическую обработку.

Необходимость механической обработки, травления и термообработки готового изделия зависит от марки свариваемого материала, исходного состояния поверхностей заготовок и требований к соединению.

Механическая обработка оказывается необходимой, если на поверхностях имеется окалина (например, при плакировании слэбов). В подобных ситуациях прибегают к строганию, фрезерованию или зачистке абразивными кругами. При сварке труб с трубными досками может потребоваться расточка отверстия в доске или обточка трубы для создания зазора определенной геометрии между

заготовками. Необходимый угол наклона может быть также получен за счет пластической деформации конца заготовки (обжатие или раздача на конус, отгиб края пластины).

Травление применяют для аустенитных сталей, алюминиевых и титановых сплавов. Эта операция выполняется за 2...5 ч до сварки.

Обезжиривание способствует стабилизации качества и производится непосредственно перед сваркой.

Сборка осуществляется на месте производства взрыва. Основное внимание уделяется обеспечению заданного зазора и равномерному распределению ВВ. Допускаемая местная кривизна или прогиб заготовки лежат в пределах 1...3 мм на 1 м длины. При сварке цилиндрических заготовок овальность и разностенность ограничиваются несколькими процентами. Взаимное пространственное фиксирование заготовок осуществляется с помощью проволочных штырей и подвесов, деревянных подпорок, прокладкой между заготовкам спиралей из проволоки и т. п. Для обеспечения концентричности расположения цилиндрических заготовок используются различного рода центрирующие элементы в виде шайб, фланцев и т. п. При наружном плакировании относительно тонкостенной заготовки для предотвращения ее деформации в процессе взрыва, внутренняя полость либо заполняется какой-нибудь жидкостью, либо внутрь вставляется массивная оправка. При плакировании полый заготовки с внутренней стороны массивная оправка устанавливается снаружи.

На поверхность метаемой заготовки может укладываться прокладка (буферный слой) из неметаллических материалов для смягчения бризантного действия ВВ на металл. В отдельных случаях (например, сварка алюминиевых сплавов) для защиты от прямого воздействия продуктов разложения ВВ поверхность может покрываться нитролаком.

Дозировка и крепление взрывчатого вещества зависит от его вида — порошок, гранулы, шнур, пластины. В случае использования сыпучего ВВ предусматривают специальные ограждения из картона (коробки, цилиндры, конусы и т. п.) соответствующих размеров и формы, которые одновременно позволяют контролировать толщину его слоя. При сварке цилиндрических заготовок для формирования кольцевого фронта детонации устанавливают конусы из гипса в других материалах, удерживающие слой ВВ. Сборка завершается установкой детонатора и монтажом электрической цепи подрыва. В качестве взрывчатого материала выбирают взрывчатые вещества и их смеси, имеющие скорость детонаций меньше скорости распространения звуковой волны в свариваемом материале ($D < c$). При соблюдении такого условия в приповерхностных слоях во время соударения заготовок успевает развиваться пластическая деформация. При $D > c$ возникают локализованные ударные волны, разрушающие металл.

Для проварки тонких заготовок (2...3 мм) может использоваться низкоимпульсный листовой ВВ (НИЛ), представляющий собой поролоновый лист, поры которого заполнены кристаллическим ВВ. Кроме того, в качестве используемых ВВ могут быть:

- механическая смесь аммонита 6ЖВ и гранулированной аммиачной селитры в соотношении по массе (1:4)...(1:2);
- смесь тротила (3%) и аммиачной селитры (97%).

Параметры режима сварки. Для образования сварного соединения приповерхностные слои заготовок должны претерпеть определенную пластическую деформацию, сопровождающуюся небольшим относительным сдвигом. Энергия, затрачиваемая на это, составляет часть кинетической энергии метаемой заготовки.

Давление p в зоне соударения должно быть

$$> K \cdot \sigma_t, \quad (14.2)$$

где σ_t — предел текучести металла при статическом нагружении; K — коэффициент, зависящий от механических свойств свариваемых материалов. Обычно $K = 10 \dots 50$ (большие значения относятся к отожженному, меньшие — к наклепанному металлу).

Это контактное давление обеспечивается при скорости соударения:

$$V_H > \frac{2K \cdot \sigma_t}{C \cdot \rho_m}, \quad (14.3)$$

где C — скорость распространения звуковой волны в свариваемом материале.

Задаваясь значением коэффициента K для конкретной марки свариваемого материала, можно, определив V_H , по формуле (14.1) подсчитать минимальное значение H . Для стали $V_H \geq 500 \dots 700$ м/с. Оптимальная скорость для мягких и пластичных металлов всегда ниже. При увеличении толщины заготовки для обеспечения необходимой скорости соударения необходимо увеличивать H .

При выборе установочного зазора Δ можно руководствоваться соотношениями $\Delta > 0,5 \cdot \delta_m$ или $\Delta = 3\delta_m \frac{V_H}{C}$. Установочный угол α обычно лежит в пределах $2 \dots 7^\circ$. При сварке по схеме с параллельным расположением заготовок конец метаемой заготовки со стороны установки детонатора отгибается на угол порядка 2° на длине около 150 мм. Зазор Δ обычно составляет 6...8 мм. На практике при отработке технологии обычно выбирают ВВ со скоростью детонации 3000...4000 м/с и корректируют режим, изменяя зазор Δ в большую или меньшую стороны и тем самым меняя скорость соударения V_H .

Оборудование для сварки взрывом. Сварка чаще всего ведется на полигонах. Заготовки устанавливают или на массивных плитах, или на грунте. В заводских условиях процесс можно вести в специальных камерах, в которые создается разряжение порядка 0,7...1,3 кПа. Сварка в камере производится при массе ВВ, не превышающей несколько килограммов. В полигонных условиях мощность может составлять десятки и сотни килограмм. Для сварки больших по размеру заготовок полигоны должны быть оборудованы транспортными средствами, подъездными путями.

Инициирование взрыва производится с помощью:

1) капсюля-детонатора, воспламеняемого огнепроводным шнуром («огневой» способ), применяемого при подрыве одиночных зарядов;

2) электродетонатора от конденсаторных взрывных машинок типа КПН (при одновременной сварке большого количества зарядов электродетонаторы соединяются последовательно);

3) детонирующего шнура (ДШ), который монтируется в общую цепь при групповой одновременной сварке небольшого количества заготовок и иницируется одним капсюлем-детонатором или электродетонатором.

14.3. МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ СВАРКА

14.3.1. СУЩНОСТЬ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ СВАРКИ

Магнитно-импульсная сварка — метод соединения металлов в твердом состоянии, при котором активация атомов поверхностных слоев и физический контакт — условия, необходимые для образования неразъемного соединения, обеспечиваются соударением заготовок под воздействием импульсного магнитного поля. Это поле создается специальным инструментом (индуктором), расположенным в непосредственной близости к поверхности свариваемой детали, при разряде на него батареи конденсаторов (рис. 14.5).

Индуктор представляет собой индуктивное сопротивление. При замыкании электрической цепи возникает колебательный процесс. Энергия, запасенная в конденсаторе, переходит в энергию магнитного поля, создаваемого проходящим через индуктор током.

Колебания носят затухающий аperiодический характер. Изменения тока в цепи во времени описываются уравнением

$$I = \frac{U}{\omega L} e^{-\frac{RT}{2L}} \sin \omega t; \quad \omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{1}{CL} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}, \quad (14.4)$$

где f — частота тока; R, L, C — параметры контура.

Переменное магнитное поле пронизывает свариваемую заготовку и индуцирует в ней вихревые токи, которые, взаимодействуя с током индуктора I , создают механические подъемные силы, вызывающие перемещение и деформацию металла деталей, расположенных вблизи индуктора.

Сила, действующая на заготовку, пропорциональна плотности тока. С уменьшением удельного сопротивления металла будет возрастать и ток при прочих равных условиях. Напряженность магнитного поля зависит от электрических параметров батареи конденсаторов и цепи с учетом формы и размеров рабочей индуктивности L (инструмента), определяющих скорость затухания колебаний в контуре.

Вследствие поверхностного эффекта плотность вихревых токов по толщине стенки неодинакова. Глубина проникновения тока зависит от

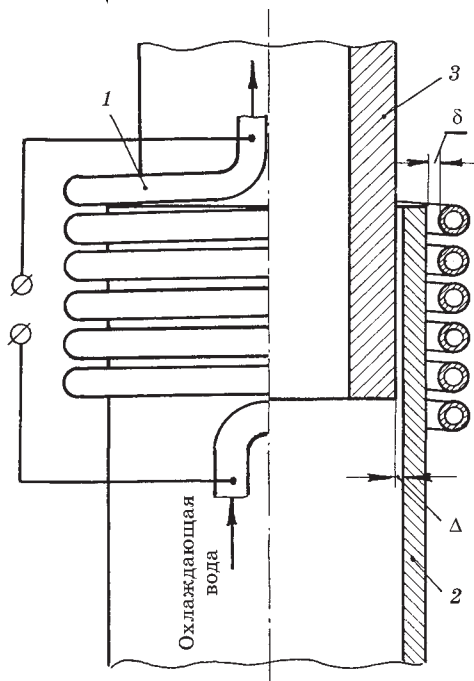


Рис. 14.5

Схема магнитно-импульсной сварки:

1 — индуктор; 2 и 3 — заготовки перед сваркой; Δ — технологический сборочный зазор; δ — зазор между индуктором и заготовкой, в которой индуцируются вихревые токи.

частоты f тока, магнитной проницаемости металла заготовки μ магнитной проницаемости воздушного зазора между индуктором и заготовкой μ_0 и удельного сопротивления ρ свариваемого металла:

$$\Delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot f}}. \quad (14.5)$$

Если глубина проникновения тока окажется больше толщины заготовки s , то магнитное поле будет индуцировать вихревые токи и во второй заготовке, создавая при этом «магнитную подушку», препятствующую деформированию первой детали. Чтобы избежать этого, необходимо увеличивать частоту тока f снижая тем самым Δ . Поскольку большая часть энергии конденсаторной батареи преобразуется в энергию магнитного поля в первый период колебательного процесса, то практически целесообразно говорить об ограничении времени первого периода t_1 :

$$t_1 = K_1 \sqrt{\frac{C \cdot d \cdot S}{l}}, \quad (14.6)$$

где d — диаметр заготовки; S — зазор между индуктором и деталью; K_1 — коэффициент пропорциональности; l — длина индуктора.

Давление на металл заготовки, возникающее под воздействием магнитного поля, описывается формулой

$$p = \mu \left(\frac{P}{5000} \right)^2 \cdot 10^{-1} \text{ Н / м}^2, \quad (14.7)$$

где H — напряженность магнитного поля.

Давление изменяется во времени в соответствии с изменением магнитного поля. Амплитудное значение давления p при использовании цилиндрического инструмента (индуктора) составляет

$$p = \frac{\mu \cdot \mu_0}{2} \cdot K_2 \frac{N^2}{l^2} I_o^2, \quad (14.8)$$

где N — число витков индуктора; K_2 — коэффициент, учитывающий плотность намотки витков индуктора и полную его длину.

Подсчеты показывают, что в процессе магнитно-импульсной сварки при соударении заготовок на их поверхностях возникают контактные давления, соизмеримые с контактными напряжениями при сварке взрывом. Природа образования соединения имеет много общего со сваркой взрывом.

Наиболее просто процесс магнитно-импульсной сварки осуществляется на нахлесточных соединениях цилиндрических заготовок. Разработаны схемы для нахлесточной сварки листовых заготовок. Роль индуктора выполняют прямолинейный медный проводник (шина) и параллельное ему массивное плоское основание из металла, между которыми устанавливаются свариваемые заготовки с определенным начальным зазором. Медная шина в основании последовательно включена в разрядную цепь.

Развитием метода МИС являются схемы, сочетающие в себе предварительный локальный нагрев металла в месте предполагаемого соединения

и последующее мгновенное деформирование при разряде конденсаторной батареи на индуктор. Для предварительного нагрева удобнее всего применять токи высокой частоты и использовать тот же самый индуктор.

Наилучшую свариваемость при использовании рассматриваемого метода проявляют пластичные металлы и сплавы с высокой электропроводностью (алюминий, медь в однородном и разнородных сочетаниях, циркониевые и титановые сплавы, алюминий со сталью в др.).

Основной тип соединений — нахлесточное, выполняемое главным образом на цилиндрических заготовках. Возможна сварка плоских элементов. Свариваемые в настоящее время толщины лежат в диапазоне до 1 мм. Применение схемы с предварительным нагревом свариваемых поверхностей позволяет увеличить толщину свариваемых этим методом заготовок. Возможна приварка рифленых заготовок к гладким поверхностям. Затраты энергии на сварку составляют 10...20% от затрат при использовании дуговой и контактной сварки. Длительность процесса исчисляется единицами и десятками микросекунд. Производительность чрезвычайно высока и определяется, по существу, затратами времени на установку заготовок и съем готовых изделий. Нагрев металла происходит в очень тонком слое. Основная доля энергии расходуется на пластическую деформацию. Распределение давления в пределах толщины стенки заготовки неравномерное: на поверхности со стороны индуктора оно равно нулю и максимально у свариваемой поверхности. При сварке металл не загрязняется посторонними примесями. Соединения обладают высокой механической прочностью, коррозионной стойкостью, вакуумной плотностью и стабильностью свойств. В шве отсутствуют интерметаллиды, не наблюдается роста зерна, нет волн и завихрений, характерных для сварки взрывом. Протяженность зоны сварки по толщине заготовки составляет десятки доли миллиметра. Процесс можно вести в вакууме и любой газовой среде. Удастся получить качественное герметичное соединение на изделиях с замкнутыми внутренними полостями.

14.3.2. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ

Параметрами процесса являются: U — напряжение заряда конденсаторной батареи, C — емкость батареи конденсаторов, L — индуктивность цепи, S — зазор между индуктором и заготовкой, l — длина индуктора, R — радиус индуктора, N — число витков.

Подготовка заготовок под сварку может включать механическую обработку щетками или шкуркой, химическую очистку свариваемых поверхностей, обезжиривание. С увеличением шероховатости поверхности прочность возрастает, при этом появляется опасность снижения герметичности. Очистке поверхностей может предшествовать развальцовка или другой метод формообразования для придания концу заготовки нужной геометрии. При сборке деталей в индукторе необходимо обеспечить постоянство зазора.

Обобщенных рекомендаций по выбору режимов сварки нет. Параметры процесса подбирают всякий раз экспериментально, руководствуясь вышеприведенными формулами.

14.3.3. ОБОРУДОВАНИЕ

Установки для сварки аналогичны установкам для магнитно-импульсной штамповки и отличаются только конструкцией рабочего органа-индуктора. В состав установки входят: зарядное устройство, батарея конденсаторов, индуктор, разрядник (прерыватель), система управления и контроля параметров процесса. Зарядное устройство состоит из повышающего трансформатора, выпрямителя на лампах или полупроводниковых диодов. Включение батареи конденсаторов в цепь индуктора осуществляется игнитронным прерывателем или с помощью воздушного разрядника открытого типа. Конденсаторы — импульсные с рабочим напряжением до 10...20 кВ. Вся разрядная цепь должна обладать минимальной индуктивностью и сопротивлением. Поэтому токоподводы выполняются из плоских медных шин, изолированных друг от друга тонкой диэлектрической прокладкой, или в виде коаксиального кабеля.

Индуктор во время работы испытывает значительные механические, тепловые и электрические нагрузки, что может привести к выходу его из строя. Современные конструкции индукторов имеют водяное охлаждение, надежную электроизоляцию и способны выдерживать до 50...100 тыс. сварок.

Обычно в магнитно-импульсных технологических установках значение зарядного напряжения лежит в пределах 5...20 кВ. При ручной загрузке и управлении производительность — до 350...400 изделий в час.

Оборудование обеспечивает дозировку энергии с точностью $\pm 5\%$. Процесс ведется без непосредственного контакта с рабочим инструментом, легко автоматизируется, что позволяет встраивать его в автоматические сборочные линии. Не требуется высокой квалификации сварщика-оператора.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Цель предварительной подготовки свариваемых поверхностей к холодной сварке.
2. Способы подготовки соединяемых поверхностей к холодной сварке.
3. Причина ограничения номенклатуры материалов, свариваемых холодной сваркой.
4. Физический смысл начальной установки соединяемых заготовок под острым углом друг к другу при сварке взрывом.
5. Причина появления зоны нагартованного металла шириной 10...100 мкм в непосредственной близости к свариваемым поверхностям при сварке взрывом.
6. Роль начального установочного зазора между свариваемыми поверхностями при сварке взрывом.
7. Механизм очистки свариваемых поверхностей в процессе сварки взрывом.
8. Природа сил, обеспечивающих соударение соединяемых заготовок при магнитно-импульсной сварке.
9. Главный фактор, обеспечивающий получение доброкачественного соединения при сварке взрывом и магнитно-импульсной на парах разноосновных металлов, имеющих металлургическую несовместимость.
10. Причины ограничения толщины метаемой заготовки при сварке взрывом и магнитно-импульсной.

15.1. КЛИНОПРЕССОВАЯ СВАРКА

15.1.1. СУЩНОСТЬ И ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА

Клинопрессовая сварка с точки зрения создания пластической деформации в зоне соединения представляет собой сварку сдвигом, но с нагревом металла для повышения его пластичности. Нагрев способствует и термической активации (рис. 15.1). Специальные оправки и конусовидная (клиновидная) заточка заготовки из более твердого металла (сечение конической заготовки имеет вид треугольника или трапеции) обеспечивает пластическое течение «мягкого» металла вдоль свариваемых плоскостей (рис. 15.2а). При этом наблюдается пластическая деформация приповерхностных слоев и заготовки из твердого материала.

Параметрами процесса являются: температура заготовок T_1 и T_2 , сила запрессовки P , скорость запрессовки V , угол заточки «твердой» заготовки α .

На ход процесса влияют также те геометрические параметры заготовок, от соотношения которых зависит ход пластического течения металла без потери устойчивости (соотношение толщины стенки, диаметра и высоты заготовки).

Технология и оборудование. Имеется несколько технологических схем процесса (рис. 15.2б, в).

При внедрении конуса (клина) в пластичный металл условия сваривания не одинаковые для вершины конуса и верхней его части, где деформации минимальны. *Технологические возможности* этого метода ограничены, но он представляет особый интерес для сварки тех сочетаний разнородных материалов, когда одна из заготовок имеет существенно большую твердость. Подогрев более пластичного металла увеличивает это различие. Возможна сварка материалов, близких по своей твердости, но

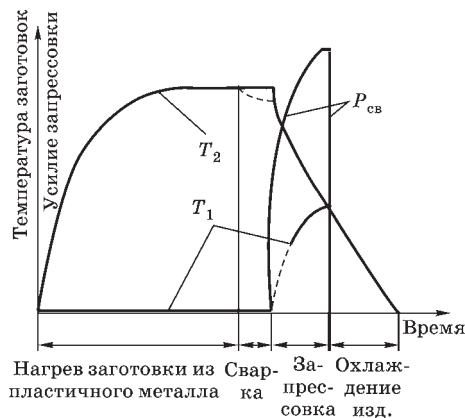


Рис. 15.1
Циклограмма процесса клинопрессовой сварки:

T_1 — температура на поверхности заготовки из твердого материала; T_2 — температура нагрева рабочего участка заготовки из пластичного металла; $P_{св}$ — усилие запрессовки (сварочное).

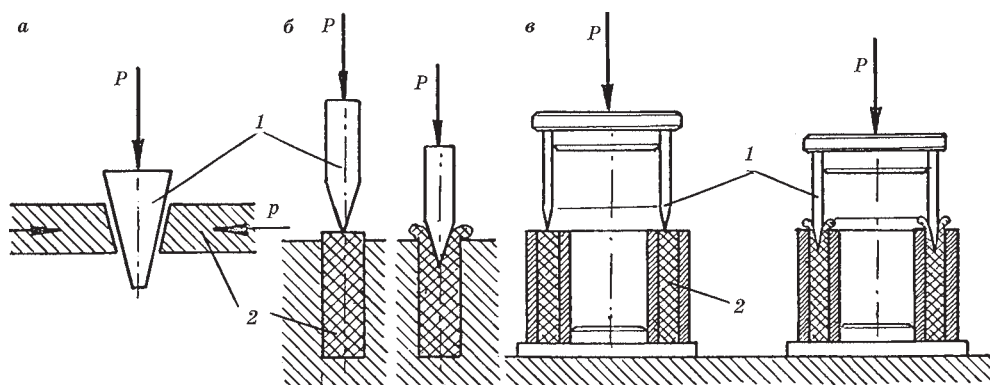


Рис. 15.2

Технологические схемы клинопрессовой сварки:

а — сварка в специальном штампе; *б* — стыковая сварка стержней; *в* — стыковая сварка трубчатых заготовок; *P* — усилие запрессовки; *1* — конусовидная заготовка из твердого металла; *2* — заготовка из пластичного металла.

в этом случае требуется разная степень нагрева каждой из заготовок. Практическое применение процесс нашел в авиационной промышленности и в космической технике.

Этим методом получают стыковые соединения. Наиболее удобны для сварки заготовки, имеющие форму трубы или стержня. Получены высококачественные соединения труб из АД1, АМц, АМГ6, АМГЗ, меди с трубами из коррозионностойкой аустенитной стали 12Х18Н10Т. Успешно сварен молибден с ниобием, сплав вольфрам — никель — железо с алюминиевым сплавом, алюминий с титаном, титан со сталью.

Особый интерес этот метод представляет для соединения композиционных материалов, в том числе бороалюминиевых композитов. Чаще всего таким способом изготавливают биметаллические переходники.

Принципиальных ограничений на размеры заготовок нет. Если одна из свариваемых деталей должна иметь размеры, не позволяющие обеспечить требуемых условий сварки, то ее размеры увеличивают и в последующем подвергают механической обработке сваренную заготовку.

Соединения имеют высокую механическую прочность, коррозионную стойкость, герметичность. Хорошо работают в условиях термоциклирования и термоудара. Угол загиба сталеалюминиевых образцов составляет 180°. В минимальной степени меняются исходные свойства материала. Процесс можно вести при температуре ниже температуры рекристаллизации более твердого материала. Не требуется сложного специального оборудования. Производительность по существу определяется длительностью нагрева и затратами времени на механическую обработку, установку и съем изделия.

Технология сварки включает в себя операции механической обработки с целью придания необходимой геометрии концу заготовки из «твердого» металла, обезжиривания поверхности, нагрева, собственно сварки. Угол заточки составляет 15...20°. Температура нагрева при сварке алюминия со сталью порядка 400°C. Вопрос о защите металла от окисления решается в зависимости от

марки материала. Для повышения прочности соединения сварку можно вести через пластичную прокладку.

Специального оборудования для клинопрессовой сварки не выпускается. Заготовки нагреваются в печах для термообработки. Запрессовку выполняют на прессах. Удобно использовать установки для диффузионной сварки с гидроприводом механизма давления.

15.2. СВАРКА ТРЕНИЕМ

Сварка трением — метод получения соединения материалов в твердом состоянии, при котором нагрев зоны соединения происходит за счет работы против сил трения, возникающих на свариваемых поверхностях, находящихся в относительном движении и прижатых друг к другу нормальной силой. Разрушение и удаление загрязнений обеспечивается за счет термического воздействия, механического износа и пластического течения металла вдоль поверхности скольжения. После достижения в зоне соединения необходимой сварочной температуры и определенной деформации металла относительное движение заготовок практически мгновенно прекращается и процесс заканчивается естественным охлаждением изделия.

Особенности метода связаны с кинетикой тепловыделения и пластического деформирования материала. На осциллограмме показано несколько стадий процесса, обусловленных изменением характера трения между свариваемыми поверхностями (рис. 15.3). На первой стадии (сухое или граничное трение), охватывающей период t_1 с начала относительного движения до достижения моментом трения своего минимального значения, выделяется незначительное количество (около 1 %) от всего тепла. Начальный пик моментов $M_{\text{нач}}$ объясняется переходом от трения покоя к трению движения. Температура поднимается незначительно. В начале второго периода t_2 она составляет 100...120°C. Однако на отдельных микровыступах температура может быть существенно выше и это вызывает изменение веществ, адсорбированных на поверхностях. Количество выделяющегося тепла в этой стадии составляет порядка 12% от общего тепловыделения. Локальное разрушение окисных пленок вызывает появление отдельных очагов схватывания, т. е. для второй стадии характерен переход к чистому трению. Образующиеся «мостики» разрушаются при продолжающемся относительном движении заготовок. Затрачиваемая на это механическая энергия переходит в тепловую. С повышением температуры облегчается процесс пластичного деформирования и разрушения «мостиков», что, в свою очередь, ведет к увеличению площади зоны схватывания. На кривой моментов наблюдаются колебания, связанные с процессом разрушения «мостиков». При M_{max} площадь зон схватывания (площадь сварки) равна номинальной площади сечения заготовки. Продолжающееся повышение температуры еще в большей степени облегчает процесс деформирования, момент сил трения имеет тенденцию к снижению, а затем к стабилизации — третья стадия процесса t_3 . Полагают, что в этот период возможно образование тонкой жидкостной прослойки (жидкостное трение). На этой стадии выделяется до 87% тепла.

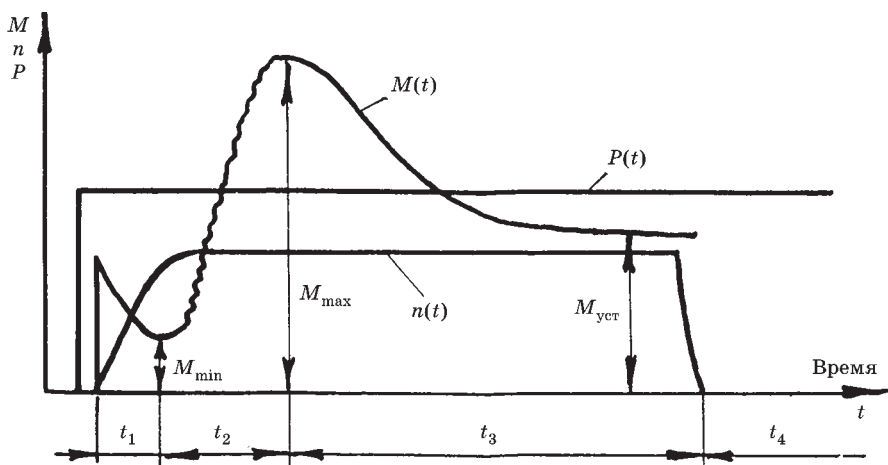


Рис. 15.3
Стадии процесса сварки трением:

t_1 — сухое или граничное трение; t_2 — чистое трение; t_3 — жидкостное трение; t_4 — охлаждение сваренного изделия; M — момент трения в стыке; P — осевое усилие; n — скорость относительного вращения.

На продолжительность первых двух стадий существенное влияние оказывает начальное состояние (чистота) свариваемых поверхностей. После практически мгновенного прекращения относительного движения заготовок, идет стадия охлаждения изделия без снятия сжимающего усилия.

Параметрами процесса являются: скорость относительного перемещения (для сварки с вращением заготовок — n , об/мин, для возвратно-поступательного движения — частота f и амплитуда колебаний A ; давление на свариваемой поверхности p , МПа (для конкретной заготовки — сварочная сила P); время сварки t , с; величина осадки Δ , мм.

Технологические схемы сварки трением, отличаются характером относительного движения свариваемых заготовок и технологическими возможностями (рис. 15.4а, б, в, г). Схема а позволяет в определенной степени снять ограничения на размеры и конфигурацию неподвижной заготовки. Встречное вращение двух заготовок (схема б) облегчает их торможение (остановку) в конце процесса нагрева. Сварка по схеме в целесообразна при соединении длинномерных заготовок или деталей, которые нельзя вращать (например, стыки трубопроводов). «Орбитальная сварка» по схеме г позволяет избежать трудностей, связанных с неравномерным нагревом свариваемого элемента по сечению из-за различия в линейных скоростях на центральных и периферийных участках. Наибольшее распространение в настоящее время получили схемы с вращением одной заготовки и осевым перемещением этой же или второй заготовки (схема а).

Существует так называемая «инерционная сварка трением», при которой относительное движение заготовок обеспечивается массивным маховиком, разогнанным предварительно до определенной скорости специальным двигателем небольшой мощности. Энергия, накопленная во вращающейся массе маховика, трансформируется в тепло, выделяющееся в процессе трения в стыке.

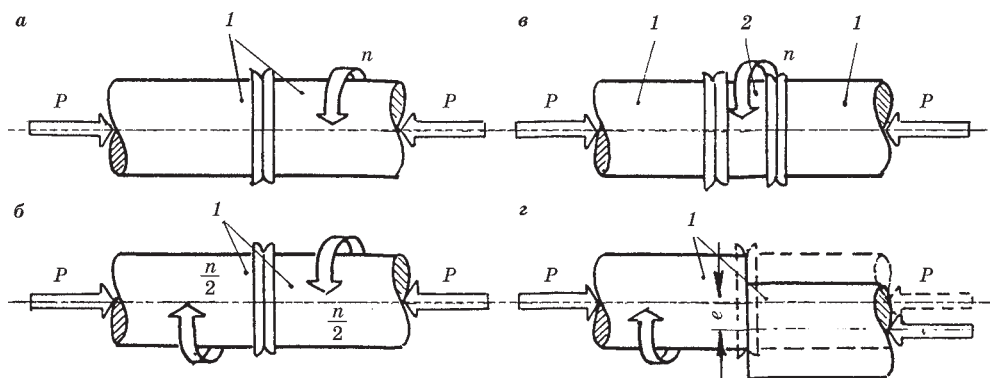


Рис. 15.4
Схемы сварки трением:

а — вращение одной заготовки и осевое перемещение второй; б — встречное вращение обеих заготовок; в — вращение промежуточного соединительного элемента с осевой подачей свариваемых заготовок, г — «орбитальная сварка» с начальным смещением осей заготовок; 1 — свариваемые заготовки; 2 — промежуточный вращающийся элемент; e — начальное смещение осей заготовки.

Особую разновидность метода представляет схема сварки трением листовых заготовок, получившая название «сварка вращающимся инструментом с перемешиванием». Нагрев материала кромок соединяемых элементов, собранных без зазора и зафиксированных в этом положении, происходит в результате трения при вращении инструмента, который перемещается по направлению стыка. Нагрев вызывает пластическое течение металла на кромках, его перемешивание вращающимся инструментом и формирование сварного шва (рис. 15.5).

Технологические возможности *сварки трением* достаточно широки. Этим способом сваривают низкоуглеродистые, углеродистые, инструментальные, высоколегированные стали различных классов, алюминиевые, медные, титановые сплавы, цирконий, как в однородном, так и в разнородных сочетаниях.

Варианты конструктивного оформления соединений ограничены в основном стыковыми соединениями, которые выполняют на стержнях, трубах и других элементах, имеющих форму тел вращения (сплошных и полых). Возможно Т-образное соединение стержней с плоскими элементами.

Диапазон размеров свариваемых заготовок достаточно широк. Считают, что

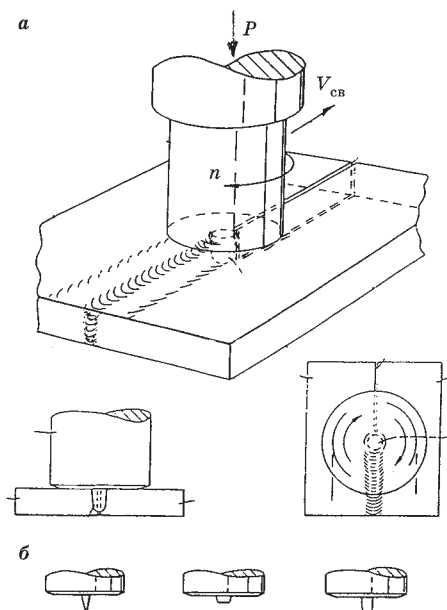


Рис. 15.5
Схема сварки трением с перемешиванием (а) и инструменты для сварки различных материалов (б)

сваркой трением целесообразно сваривать сечения площадью 30...8000 мм². В производственных условиях минимальный диаметр свариваемых прутков 6 мм.

Ограничения по длине стержневых и трубчатых, по габаритам плоских и фигурных свариваемых заготовок зависят от конструктивного решения механизмов привода вращения и зажатия деталей. Как правило, в машинах с одной вращающейся заготовкой ограничения по длине второй заготовки нет. Сварка с вращением заготовок большой массы или с асимметрией может вызвать осложнения в работе машины при торможении и в связи с дисбалансом.

При применении специальной подготовки концов заготовок, исключающей асимметрию теплового поля, возможна сварка деталей разных диаметров.

Для сварных соединений, получаемых этим методом, в большинстве случаев характерны высокие (не ниже основного материала) показатели механических свойств и высокая их стабильность. Разброс показателей прочности и пластичности не превышает 7...10%. В шве отсутствуют поры, раковины, инородные включения. Структура мелкозернистая, зерно равноосное. Это объясняется спецификой процесса сварки трением, при котором обеспечивается эвакуация из зоны соединения загрязнений, значительная пластическая деформация металла нагретой зоны при малой ее протяженности, а сами соединяемые поверхности изолированы от контакта с воздухом.

Процесс сварки трением имеет высокие экономические показатели. Удельная затрачиваемая мощность (в расчет на единицу площади свариваемого сечения) составляет 15...20 Вт/мм² против 120...150 Вт/мм² для контактной сварки, а расход энергии в 5...10 раз меньше. При этом коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,7...0,8$ (для контактной сварки 0,4...0,5). Производительность — до 60...450 сварок в час. Машинное время сварки 1...30 с. Настройка оборудования для сварки заготовок разных диаметров несложна и не требует больших затрат времени. Выполнение вспомогательных операций (укладка и зажатие заготовок, съем деталей и т. п.) легко механизмуется, а сам цикл сварки осуществляется автоматически.

Недостатками метода являются ограниченная номенклатура типов соединений, образование трудноудаляемого грата, ограничения по размерам и конфигурации вращающейся заготовки, неодинаковые условия нагрева периферийных и центральных участков свариваемого сечения.

15.2.1. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ

Подготовка заготовок к сварке несложна. Основное требование сводится к обеспечению перпендикулярности поверхности трения оси вращения заготовки. При сварке одноименных металлов допускается непараллельность торцов 5...7°. При сварке материалов с различной степенью пластичности (например, алюминия со сталью) биение торца не должно превышать 0,2 мм. К чистоте поверхности этот метод менее требователен, чем другие способы сварки.

Фигурная обработка концов заготовок производится при сварке Т-образных соединений (рис. 15.6а), сплошных сечений с трубами (рис. 15.6б), для обеспечения симметричного температурного поля, при сварке больших сечений,

когда приходится использовать машины с относительно малой мощностью (рис. 15.6а) и деталей разных диаметров (рис. 15.6б).

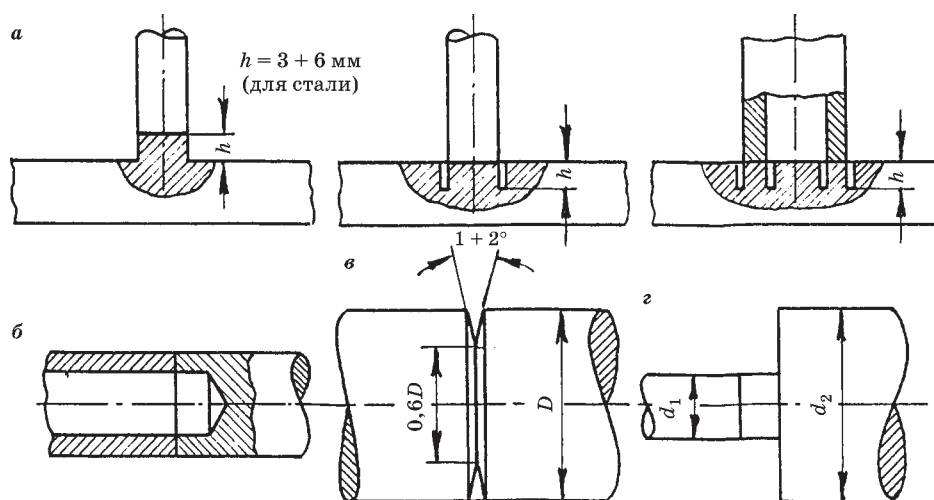


Рис. 15.6

Специальная механическая обработка концов заготовок перед сваркой трением

Создание на соединяемых поверхностях необходимых для сварки условий возможно после определенной пластической деформации металла в зоне соединения. Свариваемые заготовки в результате этого сближаются (процесс осадки), а в зоне сварки образуется грат. Величину осадки можно использовать в качестве параметра для регулирования процесса нагрева, когда при достижении определенной осадки будет подаваться команда на прекращение относительного движения. Возможно осуществлять регулирование и по времени.

Требования к подготовке поверхностей определяются способом регулирования, характером свариваемых материалов, размерами и геометрией соединяемых заготовок. Микрогеометрия свариваемых поверхностей не оказывает влияние на качество соединения. Поэтому резка заготовок может производиться самыми различными способами: на токарном станке, ножницами, в штампе, пилой, абразивным кругом и т. д.

Загрязнения свариваемых поверхностей (ржавчина, толстые оксидные пленки, жиры, масла и т. п.) могут влиять на длительность первых двух фаз процесса сварки, а при регулировании по времени это может привести к нестабильности качества соединения. В большинстве случаев тонкие оксидные пленки не влияют на качество соединения. Во всех случаях недопустима окалина. Если по каким-либо причинам нельзя использовать высокие скорости относительного вращения, повышенное давление или регулировать процесс по осадке, то необходима очистка соединяемых поверхностей от жировых и масляных загрязнений.

Различного рода небольшие по сечению макровыступы на трущихся поверхностях не влияют на течение процесса. Однако при регулировании по осадке износ этих неровностей воспринимается следящей системой как начавшаяся осадка, что приводит к низкому качеству соединения.

Таким образом, выбор способа регулирования связан с качеством подготовки поверхностей. При загрязненных торцах и при использовании малых скоростей процесс сварки контролируют по осадке. При наличии на торцах заусенцев, центральных выступов, остающихся после отрезки на токарных станках, при недостаточной параллельности свариваемых поверхностей («косые резы») — по времени.

Выбор значений основных параметров сварки производят экспериментально, ориентируясь на определенные рекомендации. Всякий раз для проверки правильности назначенного режима и его корректировки требуется проведение механических испытаний соединений на статическое растяжение, ударную вязкость и угол загиба.

От скорости относительного вращения в значительной мере зависит мощность тепловыделения в стыке, производительность процесса и локализация зоны нагрева. В большинстве случаев линейные скорости лежат в пределах 0,6...3,0 м/с. Возможно получение качественных соединений при разных значениях скоростей, но с соответствующей корректировкой других параметров. Малые скорости приводят к доминирующей роли в общей продолжительности процесса первой и второй фаз. Сварные соединения могут иметь значительную зону термического влияния. Возможно образование дефектов в виде пустот. При малых скоростях затрачиваемая мощность увеличивается. При повышении скорости эта мощность снижается. Меньшее влияние оказывает исходное состояние (чистота) торцов. Однако сильно возрастают механические нагрузки на подшипниковые узлы сварочной машины (вибрация). Для каждого сочетания материалов существует свой оптимум скорости. При переходе на сварку другого диаметра следует сохранить равенство максимальных окружных скоростей.

При сварке одноименных материалов с равными стыкуемыми диаметрами заготовок может успешно применяться простой цикл давления. Однако для большинства случаев характерно применение «проковки». Момент увеличения давления совпадает или даже несколько опережает начало торможения. Давление проковки $p_{пр}$ обычно раза в два больше давления p_n при нагреве, в отдельных случаях $p_{пр}/p_n = 3,5...4$; чаще всего $p_n = 10...80$ МПа (реже до 100 МПа), $p_{пр} = 20...150$ МПа (реже до 250 МПа). При чрезмерно больших давлениях максимальная температура в стыке снижается, выдавливается весь нагретый до пластического состояния металл и качество соединения получается низкое.

Значение осадки подбирается экспериментально и обычно лежит в пределах 2...8 мм (в редких случаях, например при сварке алюминиевых сплавов, — 15...19 мм). Меньшие значения относятся к сталям и малопластичным материалам. С увеличением свариваемого диаметра абсолютное значение осадки снижается. При сварке разноименных материалов доля участия в общей осадке каждой заготовки в силу различия в пластичности неодинакова, в отдельных случаях (например, при сварке заготовок инструмента) приходится прибегать к использованию специальных осадочных матриц, ограничивающих деформацию более пластичного и менее твердого материала.

Чтобы сохранить необходимую симметрию пластического течения металла, длина выпущенной из зажима заготовки должна составлять 0,5...1,5 ее

диаметра. Меньшее значение относится к малым диаметрам и пластичным материалам. С уменьшением вылета снижаются и вибрации.

Удаление грата может производиться на токарных станках как заключительная отделочная операция. Современные конструкции машин позволяют выполнять это в самой сварочной установке, когда металл еще полностью не охладился.

15.2.2. ОБОРУДОВАНИЕ

В состав машин для сварки трением в общем случае входят: привод вращения с устройством для торможения шпинделя, механизмы создания рабочего (сварочного) усилия, перемещения заготовки, зажатия деталей, станина, аппаратура управления и контроля. В определенных случаях могут предусматриваться механизмы и устройства для торцовки заготовок, удаления грата, регулирования соосности свариваемых деталей, автоматизации загрузки деталей и съема готовых изделий. Привод шпинделя в подавляющем большинстве машин — электромеханического типа с передачей вращения от асинхронного двигателя через клиноременную передачу. Машины, как правило, односкоростные. Скорость выбирается такой, чтобы в пределах определенного диапазона свариваемых сечений можно было получать качественное соединение за счет варьирования других параметров режима. Значительные моменты инерции вращающихся масс требуют использования специальных средств для торможения шпинделя после окончания нагрева. Нашли применение две схемы прекращения относительного движения заготовок:

- остановка всех частей привода с помощью тормоза или реверсированием электродвигателя;
- отключение шпинделя от постоянно вращающегося двигателя и последующее торможение фрикционным тормозом.

Недостатком первой схемы является перегрев обмоток двигателя при частых включениях.

Для обеспечения необходимой сварочной силы используются пневматические (до 50 кН) и гидравлические (> 100 кН) приводы.

Зажимные устройства воспринимают значительные крутящие моменты и усилия, радиальную вибрацию. Проскальзывание заготовок приводит к приварке их к рабочим поверхностям зажимных устройств. Конструкция зажимов должна обеспечить центровку заготовок, возможность работы с заготовками из горячекатаного металла и переналадку на сварку деталей различных форм и размеров. Надежное закрепление при работе без упоров обеспечивается силой, в 2,5...4,0 раза превышающей силу осадки. Это делает необходимым применение механического привода в зажимных устройствах. Наиболее универсальными, получившими широкое применение в сварочных машинах, являются самоцентрирующиеся устройства с принудительным зажатием заготовок: кулачковые — для вращающейся и призматические — для неподвижной. Универсальность этих зажимных устройств в определенном диапазоне диаметров обеспечивается комплектом сменных кулачков и призм.

Станины для машин трения делаются повышенной жесткости.

Система управления работой установки обеспечивает автоматическое выполнение всего цикла сварки (машины-полуавтоматы). В некоторых случаях предусматривается автоматическое выполнение подготовительных и заключительных операций — загрузка и зажатие деталей, подрезка торцов, удаление грата, съем готового изделия (автоматы). Настройка на режим производится предварительно путем регулирования редукторов давления, установкой контрольной величины осадки или времени нагрева. Необходимые изменения параметров процесса сварки обеспечиваются определенной последовательностью срабатывания электроклапанов.

15.3. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА

15.3.1. СУЩНОСТЬ И ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА

По механизму образования соединения следует различать ультразвуковую сварку металлов и ультразвуковую сварку пластмасс.

Ультразвуковая сварка металлов — процесс получения неразъемного соединения в твердом состоянии, при котором создание ювенильных участков на свариваемых поверхностях и физический контакт между ними обеспечивается специальным инструментом при совместном действии на заготовки нормального сжимающего усилия и знакопеременных тангенциальных относительных смещений малой амплитуды. Эти смещения происходят с ультразвуковой частотой в плоскости деталь — деталь и вместе с нормальным усилием вызывают пластическое деформирование микронеровностей приповерхностного слоя металла и эвакуацию из зоны сварки загрязнений (рис. 15.7).

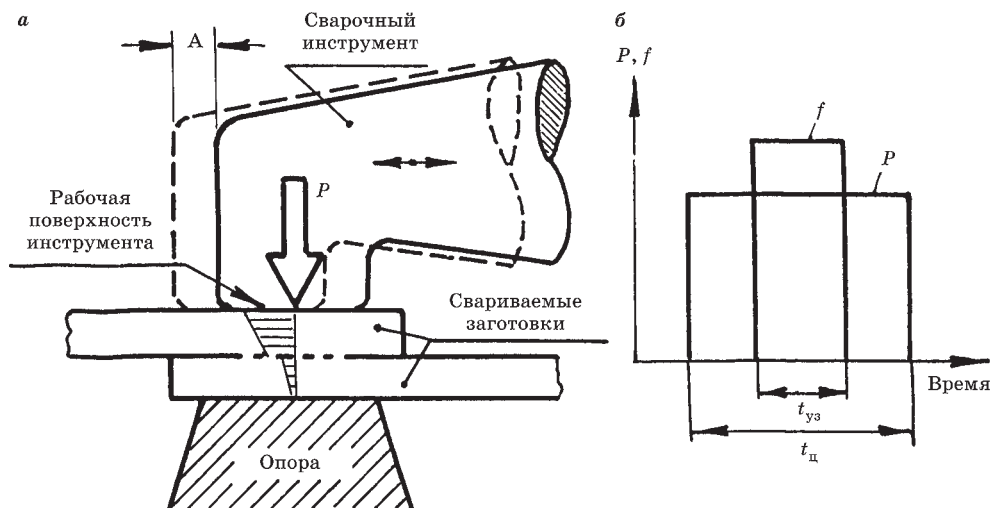


Рис. 15.7

Схема (а) и циклограмма (б) ультразвуковой сварки металлов:

A — амплитуда смещения инструмента; P — нормальное сжимающее усилие; f — частота колебаний; $t_{уз}$ — время включения ультразвука; $t_{ц}$ — время цикла сварки.

Механические ультразвуковые колебания к месту сварки передаются от инструмента через толщу материала заготовки с внешней ее стороны. Процесс организуется так, чтобы не допустить значительного проскальзывания инструмента и опоры по поверхностям заготовок. Прохождение колебаний через металл деталей сопровождается рассеиванием энергии за счет внешнего трения между свариваемыми поверхностями в начальный период (плоский источник тепла) и внутреннего трения в объемах материала, находящегося между инструментом и опорой в условиях интенсивных ультразвуковых колебаний после образования зоны схватывания (гистерезисные потери, объемный источник тепла). Это проявляется в повышении температуры в соединении до значений $(0,4 \dots 0,7)T_{пл}$. Повышение температуры, в свою очередь, облегчает пластическую деформацию. Наложение ультразвуковых колебаний вносит определенную специфику в поведение металла и в кинетику процесса сварки в целом. Тангенциальные перемещения в плоскости деталь — деталь и вызываемые ими напряжения, действующие совместно с напряжениями сжатия от сварочной силы P (сложное напряженное состояние), локализуют интенсивную пластическую деформацию в малых объемах приповерхностных слоев. При этом значение нормальных сжимающих напряжений существенно ниже предела текучести σ_t свариваемых материалов. Этот процесс сопровождается дроблением и механическим выносом оксидных пленок и других загрязнений. Пластическая деформация облегчается благодаря снижению предела текучести металла при пропускании через него ультра звуковых колебаний.

Основными параметрами процесса являются: амплитуда A колебаний рабочей части инструмента, мкм; сжимающая статическая сила P , кН; время сварки t , с; частота колебаний f , кГц.

В реальных условиях сварки частота не может меняться в сколько-нибудь значительных пределах и для конкретного оборудования является постоянной. Моменты включения и выключения ультразвуковых колебаний, как правило, располагаются в пределах цикла сварочной силы P .

Технологические схемы сварки отличаются характером колебаний инструмента (продольные, изгибные, крутильные), пространственным его расположением по отношению к поверхности свариваемого изделия, способом передачи сжимающей силы на заготовку и конструкцией опорного элемента (рис. 15.8). Для точечной, контурной и шовной сварки металлов в настоящее время используются варианты с продольными и изгибными колебаниями. Воздействие ультразвуковых колебаний может сочетаться с местным импульсным нагревом заготовок от отдельного источника тепла. При этом достигается определенный технологический эффект — возможность снижения амплитуды колебаний, силы и времени пропускания ультразвука. Энергетические характеристики теплового импульса и время его наложения по отношению к ультразвуку являются дополнительными параметрами процесса.

Технологические возможности метода и номенклатура материалов, сварка которых уже освоена, достаточно обширна. Наиболее легко соединяются пластичные металлы (серебро, медь, алюминий, никель, золото и т. п.) как между собой, так и в сочетании с твердыми малопластичными материалами. С увеличением твердости свариваемость этим методом ухудшается. Металлические

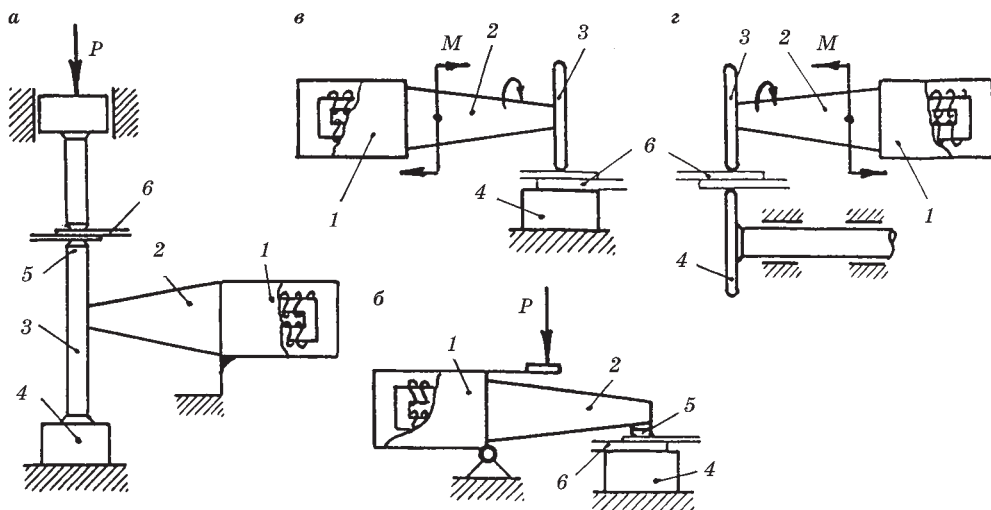


Рис. 15.8

Механические колебательные системы для точечной (а, б) и шовной (с, д) ультразвуковой сварки металлов:

1 — преобразователь; 2 — волновод; 3 — резонансный стержень или диск; 4 — опора; 5 — сварочный наконечник; 6 — свариваемые заготовки.

заготовки могут привариваться к стеклу, керамике, полупроводниковым материалам (кремний, германий). Успешно свариваются тугоплавкие металлы: вольфрам, ниобий, тантал, цирконий, молибден. Можно производить сварку заготовок через прослойку из третьего металла. Например, сталь со сталью через алюминий. Успешно свариваются металлы, покрытые слоем искусственного и естественного оксидов, лаками, полимерами и т. п.

Особую область составляет сварка деталей из термопластичных пластмасс (полистирол, полиметилметакрилат, поливинилхлорид, синтетические тканые материалы и др.).

При сварке металлов основным типом соединения является нахлесточное с различным конструктивным оформлением его элементов (рис. 15.9). Сварка может выполняться одной или несколькими точками, непрерывным швом, по замкнутому контуру. В отдельных случаях за счет специальной предварительной формовки конца проволоочной заготовки выполняются Т-образные соединения проволоки с плоскостью. Возможна сварка одновременно нескольких заготовок (пакетом). Диапазон свариваемых толщин металла ограничен верхним пределом. С повышением толщины заготовки необходимо использовать колебания большей амплитуды для компенсации потерь энергии в толще материала. Увеличение же амплитуды допустимо до определенного предела, связанного с опасностью появления усталостных трещин и образованием значительных вмятин от инструмента на поверхности заготовок. Практически осуществляется сварка плоских элементов толщиной от 3...4 мкм до 0,5...1 мм. Толщина второй детали, контактирующей с опорным элементом, практически не ограничивается. Известны случаи сварки при разнотолщинности 1 : 1000 и более.

протекает в непрерывно меняющихся условиях трения соединяемых деталей между собой и с инструментом.

Определение оптимального соотношения параметров режима сварки на основе теоретических расчетов представляет собою очень трудную многофакторную задачу, решения которой в настоящее время нет. Выбор значений параметров режима производится экспериментально на основании обработки результатов механических испытаний серии образцов, сваренных при варьировании в определенных пределах одного из параметров и при фиксированных значениях остальных. Диапазон его изменения назначается, исходя из имевшегося практического опыта. Обычная последовательность подбора: $P \rightarrow t \rightarrow A$. Значения параметров ультразвуковой сварки лежат в пределах: $P = 0,3 \dots 2000$ кН (меньшее значение относится к случаю сварки ультрамалых толщин); $A = 14 \dots 25$ мкм; $t = 0,1 \dots 4$ с; $f = 18 \dots 75$ кГц.

При выборе их значений для конкретного случая следует принимать во внимание следующее. Максимальная прочность соединения может быть достигнута при определенном значении амплитуды колебаний A , сжимающей силы P , времени пропуска ультразвука t и частоты f . Отсутствие соединения или низкая прочность обуславливается плохой очисткой свариваемых поверхностей и недостаточной пластической деформацией металла. Снижение прочности после прохождения некоторого оптимального значения — появлением усталостного разрушения и чрезмерной деформацией заготовок по толщине под инструментом. При правильном ведении процесса соотношение сил трения в парах инструмент — деталь, деталь — деталь, деталь — опора должно быть таково, чтобы отсутствовало сколько-нибудь значительное проскальзывание инструмента и опоры по поверхности заготовок. В значительной степени условия трения могут регулироваться за счет изменения статической сжимающей силы. При малом P инструмент проскальзывает по детали и сварка становится невозможной. Чрезмерное увеличение этого параметра приводит к значительным пластическим деформациям заготовок (вмятинам) и делает невозможным относительные сдвиговые смещения в плоскости деталь — деталь. Отсутствие же внешнего трения между поверхностями заготовок в начальный период не позволяет избавиться от поверхностных загрязнений, что является причиной некачественного соединения. При увеличении толщины свариваемого материала и размера сварной точки значение силы сжатия должно возрастать. Пропорционально должна увеличиваться также и амплитуда колебаний. Увеличение амплитуды колебаний и сжимающего усилия требует увеличения подводимой к ультразвуковому инструменту электрической мощности. Передача сдвиговых деформаций через толщу металла заготовки к плоскости сварки сопровождается рассеиванием энергии в материале, что в конечном счете сказывается на амплитуде относительных смещений деталь — деталь. Поэтому с увеличением толщины заготовки необходимо назначать и более высокие значения амплитуд, и тем в большей степени, чем больше коэффициент внутреннего трения материала. Появление усталостных разрушений особенно характерно для наклепанного материала. В таких случаях может быть применена, если это возможно, предварительная термическая обработка заготовок, но наиболее эффективным путем остается снижение до определенного предела амплитуды колебаний.

Длительность t процесса сварки является наименее критичным параметром и выбирается тем больше, чем больше толщина материала, его твердость и чем меньше подводимая к инструменту мощность. Процесс ультразвуковой сварки металла регламентируется по времени. Продолжительность первой фазы процесса, связанной с внешним трением, в значительной степени зависит от исходного состояния поверхностей заготовок. С повышением чистоты обработки поверхностей заготовок и с уменьшением загрязненности качество сварки повышается.

В случае использования схемы, сочетающей ультразвуковую сварку с нагревом от постороннего источника, необходимо выбрать параметры теплового импульса и определить момент его наложения. Оптимальным при сварке пластичных металлов является цикл с запаздыванием теплового импульса по отношению к моменту включения ультразвука. При относительно большой твердости материала заготовки целесообразно включать ультразвук после некоторого нагрева. Причем продолжительность воздействия ультразвуковых колебаний должна быть меньше длительности теплового импульса. Эта разновидность метода находит применение при производстве конструкции микроэлектроники.

Оборудование для ультразвуковой сварки. В состав установок для сварки металлов и пластмасс входят: генератор электрических колебаний, акустический узел, механизм давления, аппаратура управления и контроля за процессом. Акустический узел включает в себя электромеханический преобразователь, волновод с резонирующими элементами, сварочный наконечник (инструмент), обеспечивающий непосредственную передачу энергии к свариваемым заготовкам. Источником механических колебаний являются электромеханические преобразователи, работа которых основана на использовании (чаще всего) магнитострикционного или (реже) пьезоэлектрического эффектов. Материалом для преобразователей служит обычно пермендюр (К49Ф2, К65), реже — чистый никель, альфер (Ю14, Ю12), ферриты. При выборе материала учитываются не только магнитоэлектрические характеристики, но и паяемость, диапазон рабочих температур, усталостная прочность, антикоррозионные свойства. Применение феррита целесообразно в установках малой мощности (до 50 Вт). Используемые конструкции преобразователей — двухстержневого и, реже, одно- и трехстержневого типа. Обмотки возбуждения и подмагничивания располагаются непосредственно на стержнях. Во избежание перегрева предусматривается принудительное водяное охлаждение магнитостриктора, для чего он помещается в специальный бачок. Маломощные преобразователи имеют воздушное естественное охлаждение.

Передача колебательной энергии от электромеханического преобразователя к инструменту обеспечивается волноводом, который одновременно увеличивает амплитуду колебаний. В волноводах возбуждаются стоячие продольные волны. Основной характеристикой является коэффициент усиления амплитуды колебаний, определяемый отношением квадратов диаметров входного и выходного его торцов. Находят применение различные волноводы (рис. 15.10), отличающиеся по коэффициенту усиления, технологичности в изготовлении, диапазонами резонансных частот, эксплуатационной надежностью. Ступенчатый — имеет максимальный коэффициент усиления, конический — минимальный.

По широте диапазона резонансных частот выгодно отличается экспоненциальный. Для сварки по контуру применяют пустотелые волноводы. Использование асимметричных волноводов расширяет технологические возможности сварочной машины. Длина волноводов равна целому числу полуволн. Конструктивное оформление сварочного наконечника (инструмента) определяется характером и размерами свариваемых деталей.

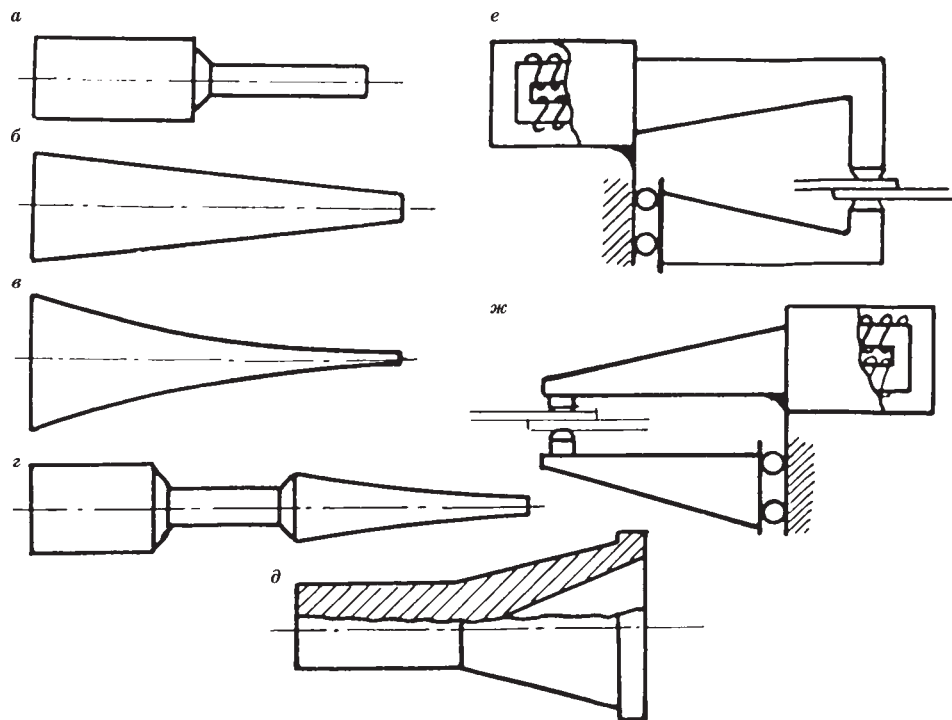


Рис. 15.10
Типы волноводов:

а — ступенчатый; *б* — конический; *в* — экспоненциальный; *г* — составной; *д* — полый; *е, ж* — асимметричные.

При работе машин может наблюдаться повышенный износ и даже растрескивание и выкрашивание металла на рабочей поверхности инструмента. Увеличение срока службы добиваются применением специальных материалов. Соединение между собой отдельных элементов механической колебательной системы производят с помощью пайки и сварки.

Ферритовые стержни приклеиваются. Соединение волновода с резонансным стержнем или диском производится пайкой, а в машинах большой мощности — сваркой.

Размеры всех элементов колебательной системы соответствуют конкретному значению рабочей частоты и не могут меняться произвольно.

Крепление колебательной системы к корпусу машины производится в точках, совпадающих с узлами колебаний. Источником питания магнитострик-

торов является серийно выпускаемые для различных технологических целей ультразвуковые генераторы. Сварочная сила создается пневмоприводом или пружиной.

Настройка машин на конкретный режим включает регулирование тока подмагничивания, сварочной силы, продолжительности пропускания ультразвуковых колебаний. Для обеспечения работы акустического узла в резонансном режиме производится подстройка частоты. Работа машины вне резонанса не рациональна.

15.4. ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА

Диффузионная сварка — способ получения неразъемного соединения материалов в твердом состоянии с чистыми (ювенильными) поверхностями за счет диффузии. Диффузия возникает между поверхностными слоями материалов находящихся в контакте заготовок в условиях повышенных температур и сжимающих напряжений, достаточных для пластической деформации микровыступов и обеспечивающих их физический контакт по всей соединяемой поверхности без значительной макропластической деформации самих деталей. Очистка соединяемых поверхностей от загрязнений (оксидных пленок, адсорбированных молекул среды) происходит при повышенных температурах за счет физико-химических процессов (возгонка, диссоциация, растворение в основном металле, десорбция, восстановление оксидов, механическое дробление окисной пленки) в среде с низким парциальным давлением кислорода (вакуум, нейтральный или восстановительный газ). Наибольшее распространение получила сварка в вакууме (рис. 15.11).

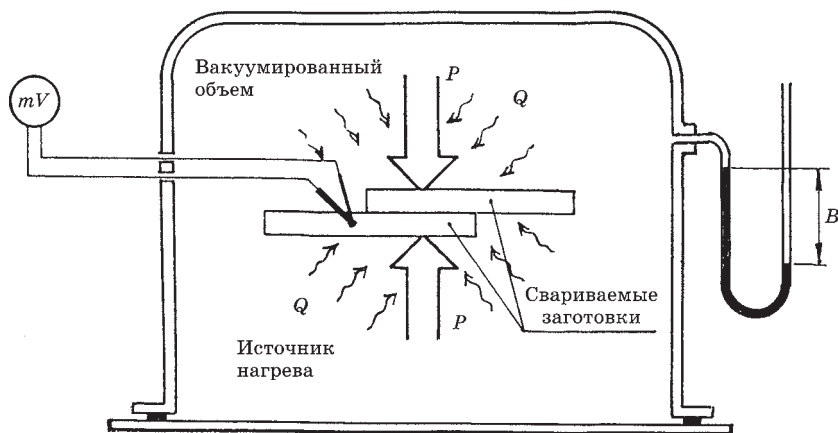


Рис. 15.11
Схема установки для диффузионной сварки в вакууме

Параметрами процесса являются: температура нагрева заготовок T° , C ; удельное сжимающее давление P , МПа; время сварки t мин; степень разреза B (рис. 15.12). В случае проведения процесса в другой среде —

характеристика этой среды с точки зрения протекания окислительно-восстановительных реакций (вид и химический состав среды, точка росы, парциальное давление кислорода).

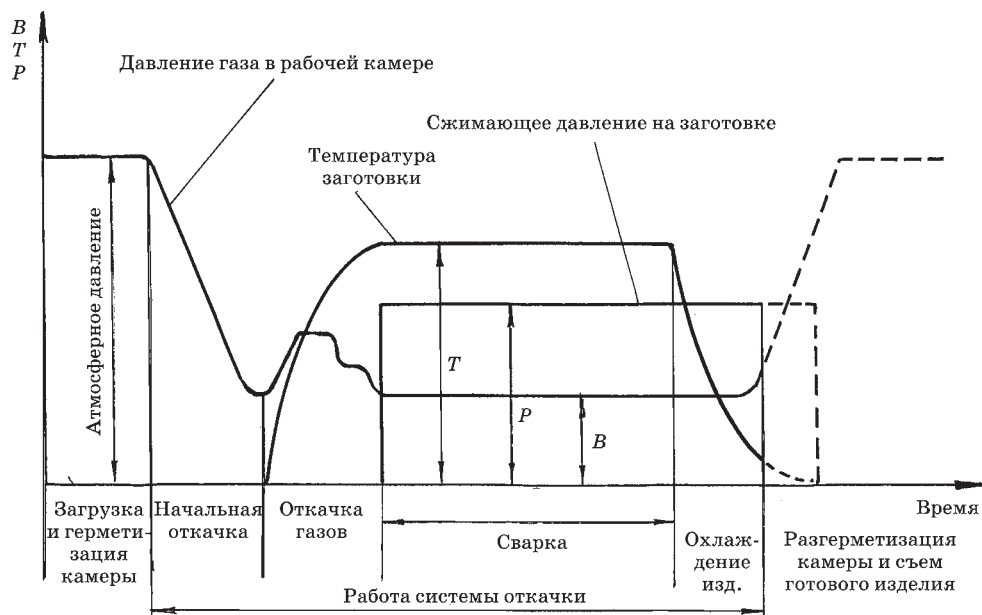


Рис. 15.12
Циклограмма диффузионной сварки

Очистка поверхности от слоя жиров, масел, толстых окисных пленок обеспечивается предварительной механической обработкой и обезжириванием. В процессе нагрева в условиях вакуума или контролируемой атмосферы с низким парциальным давлением кислорода материал освобождается от адсорбированных молекул среды за счет десорбции. Может происходить возгонка (сублимация) жировых, масляных загрязнений, диссоциация, растворение окислов в основном металле и восстановление оксидов. Возможность реализаций каждого из перечисленных механизмов определяется природой этих загрязнений и условиями ведения процесса (температура, степень разрежения, парциальное давление кислорода, углекислого газа, паров воды).

Термомеханическое воздействие на свариваемый материал облегчает разрушение малопластичных поверхностных пленок за счет чисто механического воздействия (дробления), а также вследствие различия коэффициентов термического расширения. Микронеровности пластически деформируются и тем самым решается задача получения физического контакта.

С ростом t увеличивается площадь фактического контакта. В первые моменты приложения сварочной силы это связано с активной пластической деформацией микронеровностей. В дальнейшем — с процессом неустановившейся ползучести, главным образом, в приконтактной зоне. Площадь контактирования при этом может достигать 40...75% номинальной площади (против 1...2%

в первый момент приложения нагрузки). В стадии установившейся ползучести площадь контакта возрастает до 90...95%. Завершение образования контакта происходит в результате диффузионного зарастания несплошностей.

Повышенные температуры и пластическая деформация приповерхностных слоев свариваемого материала создают энергетические условия для образования химических связей — металлических, ковалентных, ионных (в зависимости от природы соединяемых материалов).

Значительная продолжительность нахождения материалов свариваемых заготовок при повышенных температурах приводит к развитию диффузионных процессов и, как следствие, к появлению химических (интерметаллических) соединений, твердых растворов и т. д. Степень их влияния на свойства сварного соединения зависит от природы соединяемых материалов и режимов сварки. Диффузионные процессы являются завершающим этапом при этом методе сварки и обеспечивают получение соединения по всей площади свариваемой заготовки. Объемное диффузионное взаимодействие приводит к зарастанию несплошностей, образованию общих зерен в контакте, к релаксации напряжений.

Для ряда сочетаний материалов, компоненты которых не обладают взаимной растворимостью (например, медь и молибден), процессы объемного диффузионного взаимодействия не наблюдаются. При сварке же материалов, проявляющих способность к неограниченной взаимной растворимости, концентрация элементов, участвующих в диффузии, непрерывно изменяется в поперечном сечении шва.

Технологические возможности процесса достаточно широкие. Диффузионная сварка позволяет сваривать большинство конструкционных материалов на металлической основе, керамику, стекла, графит, полупроводниковые материалы в однородном и разнородных сочетаниях. Пористые, металлокерамические, композиционные материалы соединяются без нарушения их текстуры и ухудшения служебных свойств. При применении соответствующих барьерных покрытий и промежуточных проставок можно также соединять материалы с резко отличными значениями коэффициентов термического расширения, разнородные металлы и сплавы, склонные к образованию хрупких фаз, тугоплавкие металлы (вольфрам, ниобий, тантал и др.) при температурах ниже порога рекристаллизации и избежать охрупчивания металла.

Диффузионной сваркой можно выполнять все типы соединений при самом разнообразном конструктивном их оформлении, сваривать заготовки любых сечений по большим площадям с ограничением размеров свариваемых элементов только возможностями оборудования. При применении местного нагрева и вакуума можно соединять заготовки неограниченной длины. Возможна сварка пленок и фольги толщиной в несколько микрон и достаточно массивных деталей, а также осуществлять сварку при практически любой разнотолщинности заготовок.

После диффузионной сварки не нужна механическая обработка сварного шва, получаемые изделия обладают высокой размерной точностью (остаточные деформации в пределах 0,1...6%). Швы имеют показатели механической прочности и пластичности на уровне основного материала.

Кроме того, диффузионная сварка позволяет:

- получать соединения с высокой химической однородностью металла шва и, соответственно, высокой коррозионной стойкостью, стабильностью теплового и электрического контакта;
- получать плавные изменения концентрации элементов при сварке разнородных материалов по толщине шва и в связи с этим высокую сопротивляемость соединений термоциклированию;
- сваривать заготовки, имеющие замкнутые внутренние полости, совмещать процесс сварки с фиксацией во внутренних полостях изделия вакуума;
- производить одновременно спекание и приварку порошкообразного материала к металлу или другому материалу;
- производить одновременно сварку нескольких деталей (групповая сварка).

При использовании этого метода создаются хорошие гигиенические условия на производстве. Оборудование может легко встраиваться в механосборочные линии.

К недостаткам метода следует отнести значительную длительность процесса, сложность оборудования, определенные трудности с загрузкой заготовок и выгрузкой готовых изделий из рабочей камеры при организации непрерывного процесса изготовления сварных изделий, требования достаточно высокой точности сборки и чистоты обработки свариваемых поверхностей.

Технология сварки. В связи с обширной номенклатурой свариваемых материалов, имеющих различную природу и широкий диапазон физико-химических и механических свойств, а также, учитывая разнообразие конструктивных особенностей свариваемых деталей, нельзя дать универсального рецепта разработки технологии диффузионной сварки. Каждое изделие требует индивидуального подхода. В настоящее время нет методов расчета параметров режима. Их подбор производят экспериментально, опираясь на имеющийся опыт и руководствуясь некоторыми общими закономерностями.

При изготовлении сварного изделия обычно предусматриваются следующие операции: механическая обработка свариваемых поверхностей, обезжиривание, сборка, загрузка в рабочую камеру, сварка, выгрузка готового изделия, контроль. Кроме этого, в отдельных случаях могут потребоваться операции, связанные с нанесением металлических или оксидных покрытий на заготовки, термическая обработка и т. д.

При диффузионной сварке состояние и физико-химические свойства поверхностных слоев, непосредственно вступающих в контакт, играют определяющую роль в образовании сварного шва, так как процесс идет в твердой фазе без существенной макропластической деформации в зоне соединения.

Подготовка заготовок в общем случае может складываться из механической обработки, очистки от инородных загрязнений и нанесения подслоев.

Механическая обработка обеспечивает более плотное начальное прилегание свариваемых заготовок, удаление с поверхности загрязненного слоя, повышение размерной точности готового изделия, возможность снижения температуры, давления и времени сварки с улучшением микрогеометрии поверхности. С повышением чистоты обработки облегчается развитие второй стадии процесса.

Очистка поверхностей от инородных загрязнений (следов жиров, масла, полировальной пасты) может производиться растворителями (ацетон, спирт, четыреххлористый углерод и др.), путем нагрева и выдержки в вакуумной камере. В отдельных случаях применяют отжиг заготовок в среде водорода. Положительные результаты получают при обработке в растворах кислот H_2SO_4 , HCl с последующей промывкой и сушкой. При сварке изделий из некоторых сортов керамики после механической обработки производят отжиг заготовок с целью «залечивания» поверхностных дефектов. С этой же целью производят травление стекла в плавиковой кислоте HF .

Нанесение подслоев на свариваемые поверхности производят с целью:

- увеличения прочности сцепления (сваривания);
- предотвращения появления нежелательных фаз при сварке разнородных материалов (барьерные подслои);
- интенсификации стадии объемного взаимодействия;
- облегчения установления физического контакта по всей свариваемой поверхности за счет использования подслоев из пластичных материалов;
- снижения температуры и давления при сварке и, тем самым, уменьшения остаточных деформаций.

В зависимости от конкретной задачи производится выбор материала подслоя. Чаще всего — это никель, медь, серебро, золото, нанесенные на одну из свариваемых поверхностей гальваническим способом, напылением в вакууме. Толщина подслоя порядка 2...7 мкм.

Для предотвращения появления нежелательных фаз (интерметаллидов, карбидов и т. д.) или во избежание обеднения одного из свариваемых материалов каким-либо легирующим элементом наносятся более толстые покрытия, выполняющие роль барьера. Эту задачу могут выполнять и прокладки из фольги.

Материал барьерной прокладки должен выбираться так, чтобы коэффициент его диффузии в основной материал был выше, чем для элементов основного металла в прокладку.

В случае сварки материалов на основе окислов (керамики, стекла), наносимый металлический слой подвергают термической обработке с целью его окисления или облегчения диффузии в материал заготовки. Например, при сварке кварцевого стекла с медью на стекло наносят слой меди с последующим ее окислением при температуре 800°C в течение 3...5 мин до закали, а при сварке меди с оптической керамикой на основе сульфидов цинка применяют предварительное сульфидирование металла с целью повышения прочности сцепления.

Таким образом, необходимость и целесообразность назначения тех или иных операций подготовки поверхности заготовок диктуется конкретными условиями сварки, природой свариваемых материалов, требованиями к изделию, особенностями оборудования, экономическими соображениями.

Сборка — ответственная операция, от тщательного и правильного выполнения которой при диффузионной сварке во многом зависит качество соединения. В большинстве случаев сборка осуществляется вручную. Предусматриваются меры, исключающие случайные загрязнения подготовленных поверхностей.

Подслой из фольги может укладываться свободно или закрепляться на одной из заготовок с помощью контактной сварки. Подслой в порошкообразном

виде (например, порошок никеля) наносится тонким равномерным слоем на всю свариваемую поверхность.

Во избежание приваривания заготовок к опорным поверхностям сварочного приспособления и механизма давления между ними располагаются специальные прокладки из слюды, керамики или наносится порошок окиси алюминия, мел и т. п.

Перекосы сопрягаемых поверхностей могут привести к непроварам, а при работе с хрупкими материалами — к сколам. Применение специальных приспособлений облегчает достижение необходимой точности сборки. В многоместных приспособлениях равномерность передачи сварочного давления на заготовки обеспечивается конструкцией узла, передающего усилие на детали от штока механизма давления (самоустанавливающиеся опоры, использование легкодеформируемых прокладок толщиной 0,5...1 мм из пластичных материалов и другие способы). Приспособления изготавливаются из жаропрочных сплавов, молибдена и других материалов с пониженной свариваемостью.

Диффузионная сварка может производиться в вакууме, нейтральных и восстановительных газах, жидких средах. Вакуум создает наилучшие условия защиты нагретого металла и очистки свариваемых поверхностей от загрязнения. Однако в отдельных случаях особенности материала могут накладывать определенные ограничения или делать вовсе невозможным применение вакуума. В большинстве случаев процесс диффузионной сварки ведется при разрежении 100...0,1 Па. Использование более высокого вакуума оправдано, когда необходимо обеспечить высокую размерную точность изделия (уменьшение остаточной деформации заготовок) за счет соответствующего снижения температуры, давления и времени.

На ход процесса диффузионной сварки существенное влияние оказывает парциальный состав остаточных газов в камере. Попадание в рабочую зону паров вакуумного масла приводит к увеличению парциальных давлений газов-окислителей (CO_2 , H_2O) по сравнению с газами-восстановителями (CO , H_2). Специальные меры (угольные ловушки, использование безмасляных средств откачки) улучшают условия ведения процесса диффузионной сварки, особенно при пониженных температурах.

Для выбора температуры, давления и времени нет строгих рекомендаций. Качественные соединения можно получать, изменяя в определенных пределах значения каждого из этих параметров с соответствующей корректировкой других. При выборе их значений необходимо учитывать особенности свариваемых материалов и требования к изделию: возможность разупрочнения из-за роста зерна, ограничения температуры нагрева и деформации изделия.

Температуру сварки обычно назначают в пределах $(0,5...0,7)T_{\text{пл}}$. Для жаропрочных сплавов — несколько выше. При соединении разнородных материалов расчет $T_{\text{св}}$ ведется по температуре плавления наиболее легкоплавкого из них. При наличии эвтектики $T_{\text{св}}$ выбирают ниже температуры ее плавления. При сварке стекол $T_{\text{св}} = (0,75...0,9)T_{\text{размягчения}}$.

Удельное давление обычно лежит в пределах 1...20 МПа, т. е. ниже предела текучести материала. Для сварки тугоплавких и твердых материалов эти значения могут быть в несколько раз выше.

При сварке разнородных материалов физический контакт формируется, главным образом, за счет более пластичного из них. Установление же химических связей на второй стадии процесса может лимитироваться активацией поверхности более твердого. Поэтому с увеличением твердости материалов должны назначаться более высокие температуры и давления.

Время сварки составляет от нескольких до десятков минут.

На качество сварного соединения может оказать влияние и режим охлаждения. В большинстве случаев используют естественное охлаждение. Для ускорения охлаждения в камеру может напускаться нейтральный газ. В отдельных случаях сварки разнородных материалов во избежание разрушения шва необходимо искусственно снижать скорости охлаждения.

Интенсификация процесса диффузионной сварки может быть достигнута за счет наложения на обычный процесс ультразвуковых механических колебаний, циклических изменений рабочего давления и температуры, способствующих пластическому деформированию микронеровностей и активизации диффузии.

В состав установок для диффузионной сварки в общем случае входят: рабочая вакуумная камера, механизм для создания сварочного давления, источник нагрева, вакуумная система, аппаратура управления и контроля. Конкретные установки для диффузионной сварки могут иметь различное конструктивное оформление отдельных функциональных узлов и систем.

Рабочая вакуумная камера, в которой размещается свариваемое изделие, нагреватели, механизм давления, выполняется обычно цилиндрической или прямоугольной формы из нержавеющей стали. Стенки — водоохлаждаемые. Камера имеет загрузочный люк, фланец для подключения вакуумной системы, гермовводы для штока механизма давления, токоподводов нагревательного устройства, датчиков измерительных систем, смотровое окно, подсветку. Свариваемое изделие может располагаться на специальной опоре или в приспособлении. В большинстве случаев установка имеет одну камеру. Для увеличения производительности могут предусматриваться несколько камер с целью получения непрерывной загрузки и выгрузки заготовок и изделий (камеры шлюзования).

Необходимое сварочное усилие создается с помощью гидравлического, пневматического или механического устройства. В отдельных случаях сжатие заготовок обеспечивается специальными приспособлениями, принцип действия которых основан на различии коэффициентов линейного расширения материалов свариваемых заготовок и охватывающих их элементов приспособления. Такие приспособления позволяют вести сварку в серийно выпускаемых вакуумных и водородных печах. Возможно использование «мягких» оболочек-камер. Необходимое сжатие заготовок происходит за счет перепада давлений внешней газовой среды и вакуумированного пространства. В большинстве же случаев в установках для диффузионной сварки используются гидравлические и механические системы.

Оснащение рабочей камеры несколькими идентичными механизмами давления (многопозиционные установки) позволяет существенно увеличить производительность оборудования за счет совмещения охлаждения под давлением одного изделия с нагревом следующего.

Для нагрева заготовок наибольшее распространение получили индукционный, радиационный, электроконтактный способы. Источником питания

являются генераторы высокой частоты и трансформаторы. Нагрев ТВЧ наиболее универсален и позволяет нагревать заготовки в разведенном состоянии, в отличие от контактного метода, что важно с точки зрения интенсификации процесса очистки свариваемых поверхностей. Однако этот метод не применим при сварке диэлектрических материалов — керамики, кварца, стекла. Для нагрева можно применять тлеющий разряд, расфокусированный электронный луч, световое излучение.

Принципиальное построение вакуумной системы зависит от значения рабочего вакуума, количества камер, требуемой производительности оборудования. Различают установки с низким (разрежение 100 кПа...100 Па), средним (100...0,1 Па), высоким вакуумом (0,1 Па...10 мкПа).

Установки для диффузионной сварки могут иметь ручное, полуавтоматическое и автоматическое управление.

15.5. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СВАРКА

Высокочастотная сварка металлов осуществляется в режиме сварки давлением или плавлением при нагреве соединяемых участков заготовок токами, индуцируемыми в массе материала внешним переменным магнитным полем.

В основе эффекта нагрева лежит закон электромагнитной индукции: при всяком изменении магнитного потока через проводящий контур в этом контуре возникает электрический ток, имеющий такое направление, что его магнитное поле уменьшает (компенсирует) изменение внешнего магнитного потока, вызвавшего его появление.

В массе материала, имеющего электронную проводимость (металл, графит), в переменном магнитном поле наводится ЭДС, изменяющаяся с той же частотой, что и внешнее магнитное поле, и появляются индукционные токи (вихревые токи, или токи Фуко), которые и вызывают нагрев. Применение этих токов для технологических целей стало возможным после того, как были найдены практические пути их концентрации в малых объемах металла (повышение плотности тока) на основе известных в электротехнике эффектов.

Идея высокочастотного нагрева металла в технологических целях, в частности при сварке, по существу сводится к задаче концентрации магнитного поля в малом объеме материала и, как следствие, к повышению плотности индуцируемых токов в месте желаемого нагрева. Это решается созданием определенной конфигурации и интенсивности магнитного поля, в котором размещается нагреваемый объект или часть объекта, путем придания соответствующей геометрии проводнику, по которому пропускается индуктирующий ток, и расположением его по отношению к изделию.

В качестве проводника может выступать индуктор (*индукционный подвод энергии*), расположенный в непосредственной близости от зоны нагрева, или нагреваемая часть самого изделия, образующая контур, включенный последовательно в цепь индуцирующего тока (*контактный подвод энергии*).

Дополнительная концентрация индуцированного или индуцирующего тока в металле создается за счет *поверхностного эффекта, эффекта близости*

и катушечного (кольцевого) эффекта, сопровождающих протекание высокочастотных токов по проводникам.

Поверхностный эффект проявляется в неравномерном распределении плотности тока по сечению проводника в силу повышенного индуктивного сопротивления центральной его зоны, охватываемой полным магнитным потоком, в отличие от периферийной части, где индуцируемая ЭДС определяется только магнитным полем, расположенным вне проводника. В результате ток течет по тонкому наружному слою. Этот эффект оценивается глубиной проникновения тока — толщиной слоя Δ , где плотность тока уменьшается в e раз ($e \approx 2,72$):

$$\Delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot \pi \cdot f}},$$

где ρ — удельное сопротивление материала; μ — относительная магнитная проницаемость материала; f — частота изменения тока.

Электромагнитные свойства проводника не остаются постоянными при изменении температуры и напряженности магнитного поля. Магнитная проницаемость материала зависит от температуры и напряженности поля при определенной температуре (точка Кюри для стали 760°C) относительная магнитная проницаемость падает до единицы. Удельное сопротивление возрастает по мере нагрева. Это приводит к тому, что глубина проникновения тока в стали будет в 7 раз больше, чем в меди.

Протяженность зоны нагрева уменьшается с повышением частоты (табл. 15.1).

Таблица 15.1

Глубина проникновения тока в различные металлы

Материал	Температура, °С	$\rho \cdot 10^8$, Ом·м	Глубина проникновения, Δ мм, при частоте тока, кГц				
			10	70	440	1760	5280
Сталь	1000–1300	130,00	0,575	0,210	0,086	0,030	0,0200
Медь	20	1,84	0,068	0,026	0,010	0,004	0,0025
Алюминий	20	2,95	0,096	0,030	0,013	0,005	0,0032
Латунь	20	7,00	0,133	0,050	0,020	0,007	0,0036
Молибден	20	5,80	0,121	0,045	0,018	0,006	0,0043
Вольфрам	20	6,90	0,132	0,050	0,020	0,007	0,0046
Серебро	20	1,65	0,064	0,024	0,010	0,003	0,0020
Титан	20	175,00	0,665	0,250	0,100	0,030	0,0200

Эффект близости возникает в близко расположенных проводниках, включенных последовательно или параллельно. Ток в зависимости от схемы включения проводников концентрируется на поверхностях, обращенных друг к другу или на наружных соответственно при встречном или параллельном направлении токов. Эффект этот связан с взаимодействием магнитных полей, создаваемых током, который протекает по каждому из проводников.

Катушечный (кольцевой) эффект связан с искажением симметричной картины магнитного поля вокруг проводника при его изгибе. Внутри «кольца»

напряженность магнитного поля увеличивается и ток концентрируется на «внутренней» поверхности проводника.

Ферромагнитные массы, обладающие большим удельным сопротивлением (ферриты, электротехническое расслоенное железо) и расположенные вблизи элемента (проводника), по которому протекает ток, также перераспределяют магнитный поток в пространстве и, как следствие, изменяют индуктивное сопротивление части проводника. На различных его участках в результате этого ток распределяется неравномерно. Данный эффект усиливается с повышением частоты. Применение П-образных магнитопроводов «одетых» на проводник, заставляет ток концентрироваться на внешней (противоположной дну паза) стороне проводника. Это способствует концентрации нагрева в месте сварки и повышает эффективность процесса (рис. 15.13).

Влияют на распределение тока в проводниках и экраны из диамагнитных материалов. У немагнитных материалов, к числу которых относится медь, относительная магнитная проницаемость близка к единице. При размещении медного экрана в переменном магнитном поле, созданном током, протекающим по проводникам, в экране наводятся токи (сдвинутые по фазе на 180° относительно тока в проводниках), которые создают свое поле. В результате усиливается или ослабляется эффект близости и изменяется картина нагрева внутренних поверхностей проводников (рис. 15.14).

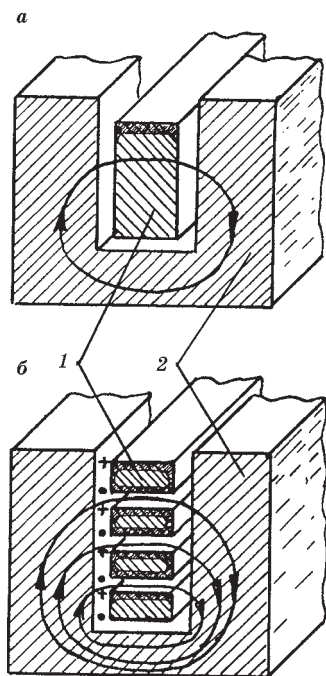


Рис. 15.13

Влияние магнитопроводов на распределение тока в одинарном (а) и многовитковом (б) проводниках:

1 — проводник; 2 — магнитопровод.

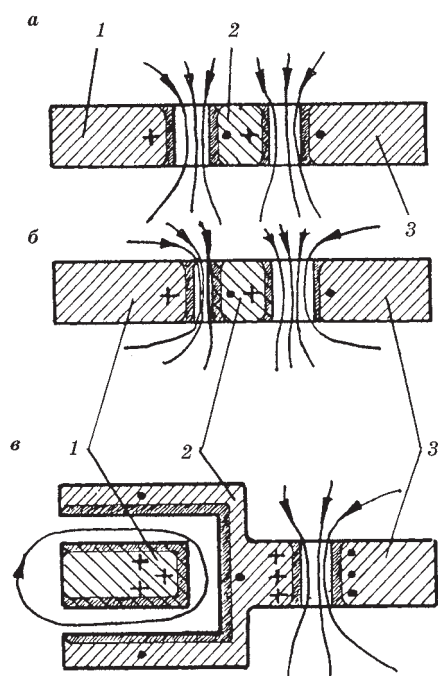


Рис. 15.14

Влияние экранов на перераспределение тока в проводниках при симметричном (а) и асимметричном (б, в) экранах:

1 и 3 — проводники; 2 — экраны.

Использование вышеперечисленных электрофизических эффектов и закономерностей позволяет добиваться локализованного выделения тепла на соединяемых поверхностях при высокочастотном нагреве.

Электромагнитные силы, действующие на нагреваемый объект, возникают в результате взаимодействия токов проводимости с магнитным полем и могут привести к перемещению (выбросу) жидкого металла из зоны нагрева. Этот эффект усиливается с понижением частоты тока.

Основными параметрами, определяющими нагрев, являются индуктирующий (сварочный) ток, его частота, подводимая колебательная мощность. Дополнительными параметрами будут факторы, влияющие на эффективность передачи колебательной энергии в металл (геометрические размеры и конструкция индуктора, концентратор магнитного поля, зазор между индуктором и нагреваемым изделием, угол схождения кромок, расстояние от токоподвода до места сварки и т. д.). В перечень параметров, определяющих режим сварки, будут также входить: сварочное давление (для соответствующих схем сварки), скорость сварки и время нагрева.

Основные технологические схемы высокочастотной сварки представлены на рисунке 15.15.

Первая схема (рис. 15.15а, б, в, г) позволяет существенно расширить номенклатуру свариваемых изделий, более экономно расходовать энергию, но при этом приходится считаться с ограниченным ресурсом работы токоподводов.

Стыковая индукционная сварка с охватывающим индуктором (рис. 15.15д) соответствует газопрессовой сварке или стыковой контактной сварке сопротивлением. При сварке по этой схеме магнитный поток, создаваемый индуктором, индуцирует в металле изделия ЭДС. Это приводит к появлению тока, протекающего по периметру заготовки. У зазора (открытая щель) он отклоняется к точке схождения кромок. Таким образом, ток течет по периметру сечения трубы и при этом плотность его невелика («паразитный» ток) и вдоль кромок к «очагу» сварки («полезный» ток). Благодаря эффекту близости и поверхностному эффекту достигается концентрация энергии (большие плотности тока) на узких участках кромок заготовок. В месте контакта кромок, в вершине угла, металл доводится до плавления. Для повышения эффективности нагрева внутрь кольцевого контура (внутри трубной заготовки) вводится ферромагнитная масса — ферритовый стержень (рис. 15.15а, д).

Реализация этой схемы возможна при высоких частотах, что и определило ее название — радиочастотная. Сварка по этой схеме применяется для изделий, имеющих замкнутое поперечное сечение. Целесообразна для непрерывной шовной сварки труб. При этом накладываются определенные ограничения на соотношение толщины стенки заготовки и диаметр, так как это определяет соотношение «полезного» и «паразитного» токов.

Обе эти схемы по сути процесса сварки аналогичны стыковой контактной сварке сопротивлением.

Стыковая индукционная сварка с линейным индуктором возможна для непрерывной шовной сварки труб и изделий аналогичного профиля, но ограниченной длины, соответствующей размеру индуктора (рис. 15.15е). Имеющийся

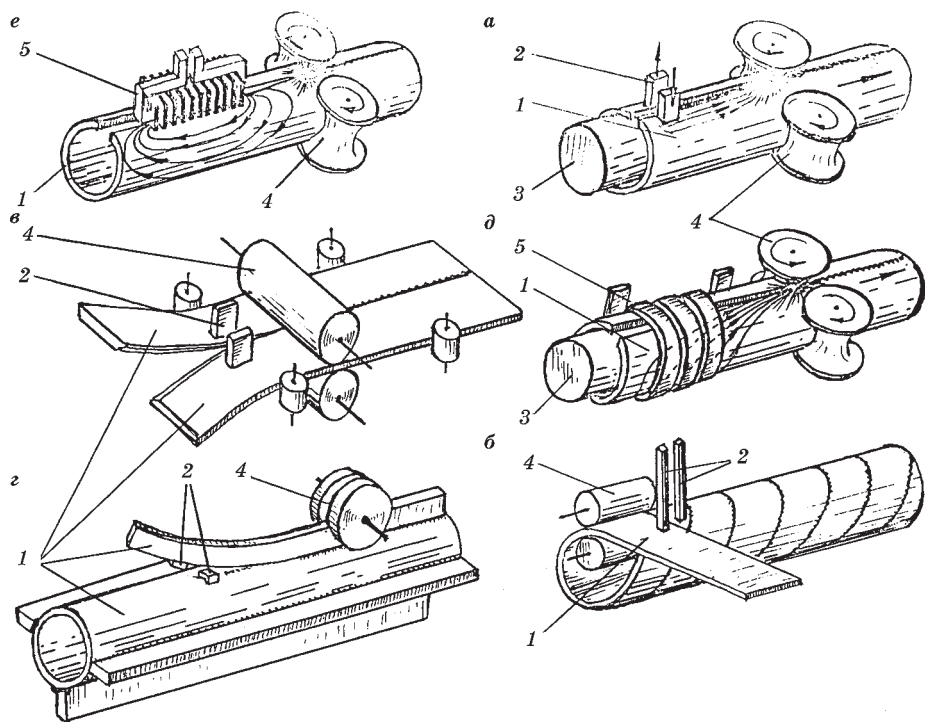


Рис. 15.15
Технологические схемы высокочастотной сварки:

а — сварка продольного шва трубы с контактным токоподводом; *б* — сварка спиральных труб с контактным токоподводом; *в* — сварка полосовых заготовок с контактным токоподводом; *г* — приварка продольных ребер к трубе; *д* — сварка продольного шва трубы с индуктивным токоподводом; *е* — шовно-стыковая индукционная сварка продольного шва трубы; 1 — свариваемые элементы; 2 — контакты; 3 — ферромагнитный стержень; 4 — обжимные устройства; 5 — индуктор.

зазор между индуктором и изделием позволяет сваривать горячекатаный материал без специальной обработки поверхности и торцов заготовки.

Технологические возможности высокочастотной сварки целесообразно рассматривать в сравнении с контактной, так как радиочастотная сварка, получившая широкое применение в производстве, развивалась как альтернативный вариант контактной с целью повышения скорости сварки труб.

Совершенствование механической части станов для контактной сварки труб не дало положительных результатов: с повышением скорости появилась строчечность шва из-за синусоидального характера тока. Переход на постоянный ток оказался неперспективным из-за того, что к быстро движущемуся изделию трудно подвести ток в десятки тысяч ампер. Эти сложности устраняются при высокочастотной сварке.

Номенклатура материалов, сварка которых уже освоена, достаточно широка: низкоуглеродистые, высоколегированные, инструментальные, аустенитные нержавеющие, кислотоупорные стали, медь, латунь, бронза, алюминий и его сплавы, цирконий, монель-металл, инконель, высокоактивные металлы, титановые сплавы, ковкий чугун и др. Возможно соединение разнородных

материалов. Принципиальных причин для ограничения номенклатуры свариваемых материалов нет.

Из-за быстрого нагрева и охлаждения металла в большинстве случаев не происходит существенных структурных изменений в шве и околошовной зоне. Скорость нагрева составляет $(8...150) \cdot 10^3 \text{°C/с}$. Появляющиеся при сварке высокоуглеродистых и низколегированных сталей закалочные структуры могут быть устранены последующей термообработкой. При сварке заготовок толщиной 1...3 мм на частоте 440 кГц ширина зоны нагрева порядка 2 мм.

Процесс можно вести в любой нейтральной или активной газовой среде, в вакууме, с применением жидких флюсов. Для местной защиты используется аргон, природный газ (при неполном сгорании которого образуется H_2 , CO , CO_2), смесь CO_2 с ацетиленом, раствор нитроклетчатки в метиловом спирте, наносимый на поверхность заготовки, и другие составы.

Скорости радиочастотной сварки доходят до 200 м/мин, но это не является пределом, так как нет принципиальных ограничений для повышения плотности энергии. Основные трудности повышения скоростей связаны, главным образом, с конструкцией стана. Удельная мощность при сварке достигает 10 кВт/см^2 . Время нагрева до температур плавления может составлять сотые доли секунды.

При непрерывной сварке подготовительно-заключительное время в расчете на единицу длины шва становится малым. Производительность при сварке цветных и редких металлов этим методом в 20...30 раз выше сварки плавлением или контактной. Меньше также расходуются дефицитные защитные газы (аргон, гелий).

Процесс сварки можно вести в твердой фазе (например, индукционная сварка с использованием прямолинейного индуктора).

Более локализованный нагрев требует меньших мощностей сварочных источников по сравнению с другими методами. Так, при контактной сварке труб с толщиной стенки 2...3,5 мм потребляется мощность 500...650 кВт, а при радиочастотной — 100...200 кВт.

При контактном токоподводе повышаются требования к чистоте поверхности заготовок, а при индуктивном способе подвода энергии можно сваривать горячекатаный материал без предварительного травления в состоянии поставки.

Высокочастотной сваркой на листовых материалах можно выполнять стыковые, нахлесточные соединения при ограниченной ширине нахлестки, тавровые и стыковые по отбортовке, а на элементах компактного сечения (стержни, полосы и т. п.) — стыковые и нахлесточные соединения.

Радиочастотной сваркой соединяют элементы толщиной от 0,8 до 14 мм. Дальнейшее увеличение этого размера приводит к значительной неравномерности нагрева по толщине заготовки, что требует увеличения длительности нагрева, и, как следствие, растет ширина нагретой зоны. В этих условиях процесс может оказаться неконкурентоспособным с дуговой и контактной сваркой. Сваривают трубы малого и среднего диаметров (12...150 мм при толщине стенки 0,8...6 мм), большого диаметра (400...600 мм при толщине листа 4...8 мм), спиралешовные (диаметр до 1000 мм), газопроводные (до 1420 мм в диаметре),

оребранные трубы, биметаллические ленты и проволоку, незамкнутые профили при таком соотношении толщин и размеров полос, которые невозможно получить методами прокатки или прессования в силу специфики свойств материала.

При сварке трубы большое значение имеет отношение толщины стенки к ее диаметру. Оно обычно составляет $(1 : 10) \dots (1 : 50)$. Расширение этих пределов вызывает определенные трудности. Более тонкие стенки могут терять устойчивость при осадке. При увеличении толщины труднее придать необходимую геометрию заготовке, увеличивается ток шунтирования.

Процесс идет без разбрызгивания металла. Получаемый грат имеет более выигрышную овальную форму без кратеров — очагов будущей коррозии. Высота графа меньше и имеет тенденцию к снижению с ростом скорости сварки. Шов имеет высокую механическую прочность и стабильность качества.

При переходе от контактной сварки к радиочастотной количество разрушений по шву при гидротестированиях уменьшалось в $10 \dots 15$ раз. Термообработкой добиваются равнопрочности соединения, улучшения пластических и технологических свойств (угол загиба $150 \dots 180^\circ$).

Метод позволяет выдерживать размеры изделий с высокой точностью. При переходе на радиочастотную сварку уменьшается масса оборудования ($\approx 35\%$), сокращаются необходимые производственные площади ($\approx 20\%$), снижаются эксплуатационные затраты, скорость сварки увеличивается на $12 \dots 50\%$ и более. Бесконтактный подвод энергии упрощает задачу автоматизации. Этому же способствует возможность автоматического регулирования процесса по одному или нескольким параметрам. Сокращается расход электродного металла. Источник питания может находиться на расстоянии $15 \dots 50$ м от сварочного устройства.

Возможность в широких пределах регулировать размеры зоны нагрева и локализовать тепловыделение в ограниченном объеме позволяет успешно применять этот способ нагрева для пайки, наплавки, резки (разделения длинномерных заготовок при локальном нагреве и приложении осевого усилия).

Процесс непрерывной высокочастотной сварки может хорошо сочетаться с термомеханической обработкой. Однако следует иметь в виду, что, как правило, при непрерывно-последовательной высокочастотной сварке начало и конец шва оказываются бракованными (непровар) на значительной длине. Процесс требует проведения мероприятий по подавлению радиопомех. Для индуктора необходима экранировка в случае, если напряженность электрического поля превышает 5 В/м (допускается кратковременное воздействие 10 В/м). Номенклатура изделий сильно ограничена спецификой организации процесса нагрева.

Технологический процесс включает в себя те же операции, что и при контактной стыковой сварке. Однако при непрерывной высокочастотной сварке добавляется операция обрезки ленты-заготовки по ширине, пристыковка очередной бухты, зачистка поперечного шва, формовка заготовки, удаление графа, резка изделия на мерные куски складского размера.

Равнопрочное соединение можно получить в достаточно широком интервале параметров.

При радиочастотной сварке они лежат в диапазонах: $I_{\text{св}} = 100 \dots 2000 \text{ А}$, $W = 25 \dots 260 \text{ кВт}$, $V_{\text{св}} = 10 \dots 120 \text{ м/мин}$ — для стали, $V_{\text{св}} = 8 \dots 80 \text{ м/мин}$ — для цветных металлов, $f = 440 \text{ кГц}$.

При индукционной сварке: $I = 30 \dots 200 \text{ кА}$, $W = 100 \dots 2000 \text{ кВт}$, $f = 50 \dots 400 \text{ (900) Гц}$, сварочное давление — $20 \dots 60 \text{ МПа}$. Эти режимы при сварке стали обеспечивают температуру $1380 \dots 1420^\circ\text{С}$.

Для обеспечения требуемого сварочного давления, особенно при сварке труб, необходимо выдерживать допуски на ширину $0,2 \dots 0,3 \text{ мм}$ и толщину заготовки $0,07 \dots 0,12 \text{ мм}$ (для толщины $1,0 \dots 2,5 \text{ мм}$).

При малой толщине заготовки угол схождения кромок $1,5 \dots 2^\circ$. При уменьшении этого угла процесс становится неустойчивым; при сварке больших толщин данный угол равен $4 \dots 5^\circ$.

Радиочастотную сварку можно вести в трех режимах:

1. Температура кромок при сварке стали — $1300 \dots 1400^\circ\text{С}$. В точке касания материал дополнительно нагревается, но не плавится. При осадке пластическая деформация обеспечивает удаление загрязнения. Удельное давление порядка 50 МПа . Грат имеет высоту $0,3 \dots 0,8 \text{ мм}$ и овальный профиль сечения.

2. Кромки при подходе к точке схождения нагреваются до температур, близких к $T_{\text{пл}}$, и в зоне контакта расплавляются. При осадке жидкий металл удаляется вместе с окислами. Жидкостная прослойка выполняет защитную роль. Сварочное давление — $20 \dots 30 \text{ МПа}$. Грат представляет непрерывную строчку застывшего металла.

3. Кромки оплавляются, и в месте контакта сильно перегревается расплав, который под действием электромагнитных сил выбрасывается вместе с окислами из зоны шва. Оставшийся на кромках жидкий металл выдавливается аналогично предыдущему варианту. Давление — $20 \dots 30 \text{ МПа}$. В граде имеются капли застывшего металла.

Низкоуглеродистые стали целесообразно сваривать по 1- и 2-му режимам. Нержавеющие стали, алюминий, медь и латуни — по 3-му (с соответствующей корректировкой температур), так как на их поверхности есть трудноудаляемые тугоплавкие окислы.

С ростом частоты уменьшаются затраты энергии в расчете на единицу толщины заготовки, сокращается зона нагрева, повышается скорость сварки. Однако выходить за границы отведенного для технологических целей диапазона частот не разрешается. Стандартные значения этих частот — $8, 10, 70, 440 \text{ кГц}$; $1,76 \text{ МГц}$.

Выбор частоты является центральным моментом определения режима. Частота не может связываться с каким-либо одним фактором или условием сварки. На ее выбор влияют теплофизические, магнитные, электрические свойства свариваемого материала и его окислов, возможные фазовые превращения в нем, толщина металла, размеры поперечного контура заготовки, предельная мощность источника, удобство канализации высокочастотной энергии, необходимость экранирования сварочных устройств. С учетом всего комплекса требований и условий в настоящее время чаще всего используют частоту 440 кГц при работе с заготовками толщиной $0,8 \dots 14 \text{ мм}$.

При индукционной непрерывной сварке с повышением частоты уменьшается протяженность зоны нагрева, но одновременно появляется опасность, что к моменту подхода к осадочному устройству температура кромок недопустимо снизится. Увеличиваются потери в теле магнитопровода. Поэтому выбор частоты регламентируется в том числе скоростью сварки и расстоянием от индуктора до осадочного механизма. При несогласованности частоты и скорости сварки может появиться «строчечность» шва. Для индукционной сварки частота всегда ниже. С повышением частоты возрастают практические трудности создания генераторов, так как при этом виде сварки токи существенно больше, чем при радиочастотной.

Выбор частоты при индукционной сварке труб необходимо связывать с гарантированным прогревом кромок на всю толщину. При этом должно соблюдаться соотношение

$$0,3 < \frac{\delta}{\Delta_{\text{гор}}} < 0,6,$$

где $\Delta_{\text{гор}}$ — глубина проникновения тока выбранной частоты в сталь при температуре выше точки Кюри.

Ширина зоны нагрева всегда должна быть несколько больше осадки при этом способе сварки. Но следует иметь в виду, что сделать индуктирующий провод меньше 10 мм практически нельзя из-за необходимости водяного охлаждения и ограничений по плотности тока. Для этого вида сварки используют чаще всего машинные генераторы с рабочей частотой 8 и 2,5 кГц.

Для выбора скорости сварки можно использовать соотношения

$$l = \frac{w}{w_0 \cdot b}; \quad t = \frac{l}{V_{\text{св}}},$$

где l — рабочая длина индуктора; w — мощность высокочастотного сварочного устройства; w_0 — удельная мощность (порядка 10 кВт/см); b — ширина рабочей трубки индуктора (индуктирующий провод); t — время нагрева; $V_{\text{св}}$ — скорость движения заготовки (скорость сварки).

Есть критическая скорость, ниже которой процесс становится неустойчивым. Скорость сварки при индукционном токоподводе меньше, чем при контактном. В последнем случае соотношение толщины и необходимой скорости сварки не зависит от размера заготовки за пределами рабочей зоны (диаметр трубной заготовки не оказывает влияния).

Скорость сварки заготовок из нержавеющей стали, алюминия, меди на 15...20% ниже, чем из низкоуглеродистой стали.

При сварке заготовок большой толщины их концы скашиваются под углом 42...70°, а прикладываемое сварочное усилие создает напряжение сжатия в зоне формирования шва. Угол схождения кромок — порядка 5...6°. Расстояние от места токоподвода до вершины угла — 120...200 мм. Бесконтактный подвод энергии с охватывающим индуктором нецелесообразен из-за больших потерь в массе заготовки. Возможно применение плоского индуктора, ограничивающего объем материала, находящегося в магнитном поле (рис. 15.16а).

При сварке несимметричных деталей для обеспечения равномерного нагрева заготовок устанавливаются либо экраны, либо дополнительный индуктор.

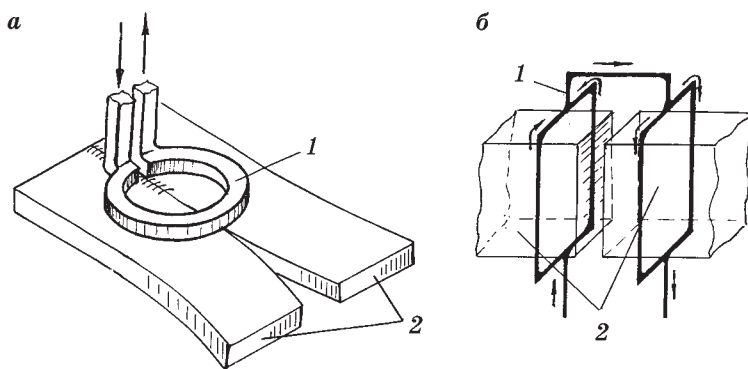


Рис. 15.16

Плоский индуктор (а) и индуктор специальной конструкции (б), обеспечивающей прогрев заготовок по сечению (стрелками показано мгновенное направление тока):

1 — индуктор; 2 — заготовки.

При сварке встык сплошных компактных сечений необходим равномерный нагрев по площади торцов, чему мешает поверхностный эффект. Выравнивание температуры происходит за счет теплопроводности, а это ведет к увеличению длительности процесса и протяженности зоны нагрева вдоль заготовки. Поэтому ограничивается предельный диаметр заготовки или ее толщина (около 30 мм). С увеличением сечения приходится снижать и частоту колебаний (при $d < 15$ мм — 70 кГц, при $d = 15...30$ мм — 8 кГц). Время нагрева определяется по той же методике, что и при нагреве под ковку или прокатку и увеличивается на 30%, так как температура при сварке выше, а допустимый перепад — меньше.

При диаметре выше 30 мм время столь сильно увеличивается, что нагрев ТВЧ становится нерациональным. Расширить диапазон площади свариваемых сечений можно, применяя индукторы специальной конструкции (рис. 15.16б). При этом заготовки собираются с зазором в несколько миллиметров. Температура на торцах оказывается выше, чем под кольцевым индуктором, в силу эффекта близости. Таким способом возможно соединять стальные прутки диаметром 30...50 мм и полосы из стали и алюминия (30×50)...(50×80) мм без газовой защиты и флюсов. После термической обработки полученные сварные соединения равнопрочны основному металлу.

Промышленное применение высокочастотной сварки связано в настоящее время, главным образом, с трубным производством, где этот процесс во многих случаях заменяет контактную и дуговую сварку.

Радиочастотной сваркой изготавливают прямошовные трубы (из сталей различных марок, алюминиевых сплавов, латуни и др.) малого и среднего диаметра (12...150 мм при толщине стенки 0,8...6 мм) и большого диаметра (400...600 мм при толщине 4...8 мм).

Сваривают спиралешовные трубы: диаметром до 600 мм при толщине стенки до 10 мм, диаметром 1020 мм при толщине до 12 мм, диаметром 150...350 мм при толщине 0,8...1,5 мм. Нахлестка составляет 2...3 мм, скорость сварки — больше 30 м/мин. При использовании дорна (оправки) толщина стенки может

быть меньше (0,2...0,5 мм при скорости сварки 100 м/мин). Спиральные тонкостенные трубы идут на изготовление воздухопроводов, каналов для транспортировки сыпучих материалов, тары и других целей.

Благодаря высокой размерной точности, трубы из латуни (диаметр 20...76 мм), изготовленные с помощью высокочастотной сварки, применяют в производстве волноводов; прямошовные трубы из АМг диаметром 220 мм и спиральные диаметром 180 мм — для оросительных систем; плоскоовальные трубы из алюминия и латуни с толщиной стенки 0,1...0,3 мм — для радиаторов автомобилей.

Рассматриваемым методом изготавливают также квадратные и прямоугольные трубы различного назначения из полос шириной до 500 мм.

Сварка биметаллических полос (толщина до 14 мм) позволяет получать заготовки для инструмента.

Токи высокой частоты нашли применение при изготовлении биметаллического провода (сталь + алюминий, сталь + медь) со скоростью сварки до 60 м/мин. Успешно сваривают алюминиевые оболочки кабеля (диаметр 20...40 мм, толщина 1...2 мм), при этом обеспечивается необходимая непрерывность шва длиной 0,5...1 км.

Освоена стыковая сварка труб диаметром 25...42 мм в котлостроительной промышленности. Выпускаются оребренные (плавниковые) трубы для паровых котлов, трубы со спиральным ребром (высота до 15 мм) для теплообменников.

Высокую экономическую эффективность радиочастотная сварка дает при изготовлении тонкостенных профилей из стали, титановых и других сплавов, получение которых методами прокатки невозможно.

Индукционная сварка находит менее широкое применение и используется при изготовлении толстостенных труб котлоагрегатов, корпусов железоникелевых аккумуляторов, трубных панелей трансформаторов и т. п.).

Кроме того, нагрев токами ВЧ находит самое широкое применение при пайке (изготовление инструмента, трубопроводные авиационные системы, волноводы и т. д.), для наплавочных работ (клапаны ДВС, рабочие поверхности паровых задвижек АЭС. инструмент и т. д.).

При высокочастотной сварке *дефекты в шве* появляются вследствие:

- разрегулирования механической части оборудования, формовочного и осадочного устройств (биение валков, смещение шва относительно оси клетки — излом профиля трубы в месте шва, деформация кромок и т. п.);
- нарушения работы генератора или неправильного выбора параметров сварки (строчечность, негерметичность, непровары, окисные включения, перегрев металла и т. д.);
- смещения индуктора, ферритового сердечника или его перегрева;
- непостоянства размеров заготовки (по толщине и ширине ленты при изготовлении труб).

О нормальном ходе процесса говорит вид срезаемого грата: стружка реза сходит без раздвоения.

Качество шва оценивается экспериментально или ультразвуковым методом. При сдаточном контроле труб применяют гидропрессовку.

15.5.1. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВАРКИ

В общем случае оборудование включает:

- нагревательное устройство (индуктор или скользящий контакт для подвода к изделию энергии с соответствующим механизмом для регулирования его пространственного положения и прижатия токоподвода, ферритовый стержень или магнитопровод для концентрации энергии в зоне сварки. В отдельных случаях — экраны для перераспределения энергии между заготовками);
- генератор высокочастотных электрических колебаний;
- токоподводы и согласующее устройство;
- механизмы фиксации заготовки и осадки;
- аппаратуру управления.

В специализированных установках, кроме перечисленных, могут быть дополнительные устройства и механизмы различного назначения: для удаления гарта, формовки заготовки и т. д. Примером может служить трубосварочный стан.

Нагревательное устройство (индуктор или скользящий контакт). Основная часть индуктора — индуктирующий провод. Выполняется из медных трубок прямоугольного сечения $10 \times 6 \times 1$ и $17 \times 10 \times 1,5$ мм. Внутренний размер охватывающего индуктора такой, чтобы зазор с заготовкой был $2,5 \dots 9$ мм. Индукторы, как правило, имеют один, реже — несколько витков. Расстояние между витками берется минимальным, при котором еще нет опасности пробоя ($2 \dots 4$ мм). В стыковой сварке могут использоваться разъемные индукторы. Для повышения КПД индуктирующий провод может быть окружен П-образным магнитопроводом, набранным из тонких пластин электротехнической стали (трансформаторное железо Э-44 для частот $8 \dots 10$ кГц) или из феррита (НН-400 или НМ-2000 для радиочастотной сварки). При сварке труб внутрь заготовок вводится стержень, который набирается из ферритовых колец ($D_{\text{нар}} = 8 \dots 45$ мм, $d_{\text{вн}} = 2,5 \dots 12$ мм, высота $10 \dots 45$ мм) на медной трубке. Минимально возможный диаметр ферритового стержня определяет и наименьший размер свариваемой трубы. Выбор длины стержня зависит от диаметра и толщины стенки трубы. Зазор между стержнями и заготовкой — $1 \dots 7$ мм.

В случае контактного подвода энергии рабочая трущаяся часть выполняется из износостойкого материала (вольфрам, молибден, порошкообразный композит (W-Ag или Mo-Ag). Размер рабочей площади — $(2 \dots 4) \times (6 \dots 15)$ мм при высоте $h = 4$ мм. При большей высоте повышается износ из-за плохого охлаждения. Поджатие токоподвода к заготовкам осуществляется пружинами. Ресурс их работы составляет $25 \dots 40$ км шва. Контактный подвод энергии применяют при сварке спиральных труб, тавров, приварки продольных и спиральных ребер к трубам и т. п.

Токоподводы и индукторы имеют водяное охлаждение и электрически разобщены с механической частью установки. Плотность тока в индукторе — порядка 500 А/мм^2 . Обязательно внутреннее и наружное охлаждение ферритового стержня.

Возможно применение катящихся контактов, соединенных коаксиальным кабелем с вторичной вращающейся обмоткой высокочастотного трансформатора.

Но это увеличивает габариты всей установки и требует большого усилия прижатия.

В качестве источников питания используются *машинные и ламповые генераторы*. Машинные генераторы имеют асинхронный двигатель, насаженный на один вал с генератором индукторного типа (с зубцовым безобмоточным ротором). Характеристики этих генераторов таковы: мощность 100...500 кВт, $f = 8...10$ кГц, $\cos\varphi$ 0,9...0,95, КПД = 74...82%. Ламповые генераторы имеют мощность 160...630 кВт, $f = 440$ кГц, КПД 0,5...0,6, ПВ = 100%.

Конструкция *осадочного устройства* зависит от конфигурации заготовки и расположения швов на изделии. При стыковой сварке механизмы давления аналогичны тем, что применяются в машинах для стыковой контактной сварки. При изготовлении труб используют систему двух валков при диаметре заготовки менее 300 мм, а при больших диаметрах — обжимные клетки, имеющие несколько валков. Для обеспечения определенного положения кромок устанавливается специальный направляющий нож. Он представляет собой две изолированные друг от друга закаленные пластины, которые специальным механизмом могут перемещаться по трем координатам в процессе настройки.

Расстояние между осью валков и индуктором в значительной степени определяет соотношение тока «полезного» (сварочного) и «паразитного». Это расстояние обычно составляет 35...80 мм и зависит от диаметра трубы.

Если напряженность электрического поля вблизи индуктора превышает норму (5...10 В/м), то делается экранировка алюминиевыми листами.

Для уменьшения потерь в массе несущих конструкций, на которых монтируется нагрузочный контур, они выполняются из алюминиевых сплавов. Для автоматического регулирования нагрева может быть использовано фотопирометрическое устройство. Перевод трубосварочных станков с контактной сварки на высокочастотную требует модернизации всего оборудования.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В результате каких процессов идет освобождение соединяемых поверхностей от загрязнений при диффузионной сварке?
2. Характер напряженного состояния в свариваемом материале соединяемых заготовок в непосредственной близости к соединяемым поверхностям при сварке трением, ультразвуком и клино-прессовой сварке.
3. Особенности нагрева и пластической деформации металла заготовок в зоне формируемого соединения при сварке трением и ультразвуковой.
4. Специфика удаления окисной пленки при сварке алюминиевых сплавов трением по схеме вращающегося инструмента (сварка трением с перемешиванием).
5. Способы регламентации процесса сварки трением.
6. Физические явления, используемые для повышения плотности тока на соединяемых поверхностях при высокочастотной сварке.
7. Способы передачи электрической энергии в зону нагрева заготовок при высокочастотной сварке.
8. Роль грата при высокочастотной сварке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов, В. С.* Оборудование и технология дуговой автоматической и механизированной сварки : учебник. — М. : Издательский центр «Академия», 1999. — 319 с.
2. *Попов, В. А.* Дуговая и газовая сварка сталей : учебное пособие. — Тверь : Центр подготовки персонала ОАО «Тверьэнерго», 1997. — 375 с.
3. Сборник нормативных документов системы аттестации сварщиков и специалистов сварочного производства. — М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. — 102 с.
4. Справочник по конструкционным материалам / под ред. Б. Н. Арзамасова, Т. В. Соловьевой, С. А. Герасимова [и др.]. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. — 640 с.
5. *Чернышов, Г. Г.* Технология электрической сварки плавлением : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. — 2-е изд., перераб. — М. : Издательский центр «Академия», 2010. — 496 с.
6. *Гуляев, А. И.* Технология и оборудование контактной сварки : учебник для машиностроительных техникумов. — М. : Машиностроение, 1985. — 256 с.
7. *Кочергин, К. А.* Контактная сварка. — Л. : Машиностроение, 1987, — 240 с.
8. Оборудование для контактной сварки : справочное пособие / под ред. В. В. Смирнова. — СПб. : Энергоатомиздат, 2000. — 848 с.
9. Технология и оборудование контактной сварки : учебник для вузов / под ред. Б. Д. Орлова. — М. : Машиностроение, 1986. — 352 с.
10. *Чулошников, П. Л.* Точечная и роликовая электросварка легированных сталей и сплавов. — М. : Машиностроение, 1974. — 232 с.
11. Сварка. Резка. Контроль : справочник : в 2 т. / под общ. ред. Н. П. Алешина, Г. Г. Чернышова. — Т. 1 / Н. П. Алешин, Г. Г. Чернышов, Э. А. Гладков [и др.]. — 624 с.; Т. 2 / Н. П. Алешин, Г. Г. Чернышов, А. И. Акулов [и др.]. — 480 с. — М. : Машиностроение, 2004.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
ЧАСТЬ I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ	
ГЛАВА 1. ВИДЫ СВАРКИ И СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ	8
1.1. Основные термины и определения при сварке. Классификация видов сварки, сварных соединений и швов	8
1.1.1. Термины и определения при сварке	8
1.1.2. Классификация видов сварки	9
1.2. Виды сварки плавлением	11
1.2.1. Дуговая сварка	11
1.3. Сварные соединения и швы при сварке плавлением	12
1.3.1. Сварные соединения	12
1.3.2. Сварные швы	13
1.3.3. Конструктивные элементы сварных соединений	19
Контрольные вопросы	20
ГЛАВА 2. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	21
2.1. Назначение сварочных материалов	21
2.2. Сварочная сплошная и порошковая проволока, ленты, прутки, порошки	23
2.2.1. Сварочная сплошная проволока	23
2.2.2. Сварочная порошковая проволока	25
2.2.3. Проволока порошковая наплавочная	28
2.2.4. Лента порошковая наплавочная	28
2.2.5. Лента наплавочная спеченная	28
2.2.6. Прутки для наплавки	28
2.2.7. Порошки для наплавки и напыления	29
2.3. Покрытые электроды для дуговой сварки и наплавки	29
2.3.1. Покрытие электрода	29
2.3.2. Виды электродных покрытий	32
2.3.3. Классификация и условные обозначения электродов	35
2.4. Характеристики плавления электродов	36
2.5. Неплавящиеся электроды	37
2.6. Флюсы для дуговой и электрошлаковой сварки	38
2.7. Защитные газы	40

ГЛАВА 3. СУЩНОСТЬ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ	43
3.1. Ручная дуговая сварка	43
3.1.1. Сущность процесса	43
3.1.2. Основные параметры режимов при ручной дуговой сварке	45
3.1.3. Технология сварки различных типов соединений и швов	46
3.1.4. Техника выполнения стыковых и угловых швов	48
3.1.5. Техника сварки металла различной толщины	49
3.1.6. Повышение производительности ручной сварки	52
3.2. Сварка под флюсом	54
3.2.1. Особенности процесса сварки под флюсом	54
3.2.2. Способы сварки под флюсом	57
3.2.3. Подготовка и сборка деталей под сварку	58
3.2.4. Параметры режима при сварке под флюсом	61
3.2.5. Техника сварки под флюсом различных типов швов и соединений	63
3.3. Технология сварки в защитных газах	65
3.3.1. Особенности сварки в защитных газах	66
3.3.2. Подготовка деталей под сварку и параметры режима	69
3.3.3. Основные параметры режима	69
3.3.4. Сварка неплавящимся электродом в инертных газах	70
3.3.5. Сварка плавящимся электродом в активных газах и смесях газов	76
3.3.6. Сварка порошковыми проволоками	80
3.3.7. Сварка точечных швов в защитных газах	81
3.4. Технология электрошлаковой сварки	81
3.4.1. Особенности электрошлакового процесса	82
3.4.2. Материалы для электрошлаковой сварки	84
3.4.3. Техника электрошлаковой сварки различными способами	84
3.4.4. Особенности сварных соединений и их термообработка	90
3.5. Специальные виды сварки плавлением	91
3.5.1. Плазменная сварка	91
3.5.2. Электронно-лучевая сварка	93
3.5.3. Лазерная сварка	95
Контрольные вопросы	97
ГЛАВА 4. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ	98
4.1. Общие сведения	98
4.2. Оборудование для ручной дуговой сварки	99
4.2.1. Оборудование сварочного поста	99
4.2.2. Электрододержатели для сварки покрытыми электродами	100
4.2.3. Оборудование для ручной дуговой сварки неплавящимся электродом	101
4.3. Оборудование для автоматической и механизированной дуговой сварки	103
4.3.1. Основные принципы работы сварочных автоматов и полуавтоматов	103

4.3.2. Полуавтоматы для дуговой сварки	104
4.3.3. Конструктивные особенности механизмов подачи.	107
4.3.4. Особенности конструкции механизмов перемещения	110
4.3.5. Газовая аппаратура для сварки в защитных газах	113
4.3.6. Флюсовая аппаратура	115
4.3.7. Сварочные горелки и токоподводы	117
4.4. Оборудование для электрошлаковой сварки	121
4.5. Особенности оборудования для плазменной сварки	125
4.6. Оборудование для лазерной сварки	128
4.7. Оборудование для электронно-лучевой сварки	131
Контрольные вопросы	134
ГЛАВА 5. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ СТАЛЕЙ И ЧУГУНА	136
5.1. Сварка низкоуглеродистых и низколегированных сталей.	136
5.1.1. Общие сведения	136
5.1.2. Основные структурные зоны в сварном соединении	138
5.1.3. Формирование в сварных соединениях химической неоднородности	139
5.1.4. Основные превращения в сталях.	140
5.1.5. Фазовые превращения в околошовной зоне и их влияние на свариваемость стали.	144
5.1.6. Классификация сталей	147
5.1.7. Сварка низкоуглеродистых сталей	150
5.1.8. Сварка низколегированных перлитных сталей	152
5.1.9. Сварка микрелегированных сталей	154
5.1.10. Сварка теплоустойчивых перлитных сталей	154
5.1.11. Сварка низколегированных сталей высокой прочности	156
5.2. Сварка углеродистых и среднелегированных сталей	157
5.2.1. Структура и свойства сталей	157
5.2.2. Сварка низкоуглеродистых бейнитно-мартенситных сталей	159
5.2.3. Сварка среднелегированных мартенситно-бейнитных сталей	162
5.3. Сварка высоколегированных сталей и сплавов	165
5.3.1. Основные характеристики сталей и общие технологические приемы сварки	165
5.3.2. Особенности сварки высокохромистых сталей	169
5.3.3. Особенности сварки высоколегированных хромоникелевых сталей	176
5.4. Сварка чугуна	185
5.4.1. Классификация чугунов и их свариваемость	185
5.4.2. Горячая сварка чугунов	189
5.4.3. Холодная сварка чугунов	191
Контрольные вопросы	193
ГЛАВА 6. СВАРКА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	194
6.1. Основные свойства цветных металлов и сплавов	194
6.2. Особенности сварки алюминиевых сплавов	198
6.3. Особенности сварки меди и медных сплавов	202
6.4. Особенности сварки титана и его сплавов	207
Контрольные вопросы	212

ГЛАВА 7. СВАРКА РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ	213
7.1. Сварные соединения разнородных сталей	213
7.2. Особенности технологии сварки сталей разных структурных классов	218
7.3. Особенности технологии сварки разнородных сталей одного структурного класса	221
7.4. Сварка двухслойных (плакированных) сталей	223
Контрольные вопросы	224

ЧАСТЬ II. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

ГЛАВА 8. КРАТКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ	226
Контрольные вопросы	232

ГЛАВА 9. ФОРМИРОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ТОЧЕЧНОЙ, ШОВНОЙ И РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКЕ.....	233
9.1. Общая схема формирования соединения	233
9.2. Электрическое сопротивление и нагрев металла	236
9.2.1. Источники теплоты при контактной сварке	236
9.2.2. Электрическое сопротивление контакта	237
9.2.3. Собственное активное сопротивление деталей	247
9.2.4. Общее электрическое сопротивление зоны сварки.....	251
9.2.5. Нагрев металла в зоне сварки	254
9.2.6. Тепловой баланс в межэлектродной области и расчет сварочного тока	258
9.3. Пластическая деформация металла при сварке.....	264
Контрольные вопросы	270

ГЛАВА 10. ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СТЫКОВЫХ СПОСОБАХ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ.....	271
10.1. Формирование сопротивлений зоны сварки перед протеканием сварочного тока	271
10.2. Формирование сварного соединения при стыковой сварке сопротивлением	274
10.3. Формирование сварного соединения при стыковой сварке оплавлением	282
Контрольные вопросы	289

ГЛАВА 11. ТЕХНОЛОГИЯ ТОЧЕЧНОЙ, ШОВНОЙ И РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ.....	290
11.1. Конструирование узлов и подготовка деталей к точечной (шовной) сварке	290
11.2. Циклограммы, параметры режима и условия точечной сварки различных металлов и сплавов	294
11.2.1. Разновидности схем точечной сварки и циклограмм процесса	294
11.2.2. Параметры режима и условия выполнения точечной сварки, критерии их выбора.....	297
11.2.3. Техника и режимы точечной сварки различных металлов и сплавов	300

11.2.4. Сварка деталей разной толщины и разноименных металлов	306
11.2.5. Прочностные показатели соединений, выполненных точечной (шовной) сваркой	308
11.3. Особенности шовной сварки; циклограммы и параметры режима	311
11.4. Рельефная контактная сварка	314
11.5. Дефекты точечной, шовной и рельефной сварки, причины их появления и методы предупреждения	320
Контрольные вопросы	324
ГЛАВА 12. ТЕХНОЛОГИЯ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ	325
12.1. Применение контактной стыковой сварки.	325
12.2. Выбор способа стыковой сварки. Конструирование и подготовка деталей к сварке	326
12.3. Циклограммы, параметры режима и техника стыковой сварки сопротивлением	329
12.4. Циклограмма, параметры режима и техника стыковой сварки оплавлением	333
12.5. Методы интенсификации нагрева при стыковой сварке оплавлением	340
12.6. Дефекты стыковой сварки, причины их появления и методы устранения	343
12.7. Схема технологического процесса изготовления изделия с применением стыковой сварки	346
12.8. Контактная стыковая сварка основных конструкционных материалов	347
12.8.1. Сварка углеродистых и низколегированных сталей	347
12.8.2. Сварка чугуна	350
12.8.3. Сварка аустенитных сталей	351
12.8.4. Сварка алюминия и его сплавов	354
12.8.5. Сварка титана и его сплавов	356
Контрольные вопросы	358
ГЛАВА 13. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ	359
13.1. Состав, основные параметры и классификация контактных машин	359
13.2. Энергетические параметры, нагрузочные и внешние характеристики, режим работы контактных машин	362
13.3. Электроды контактных машин	366
13.4. Контактторы	371
13.4.1. Общая характеристика контакторов	371
13.4.2. Асинхронные контакторы	372
13.4.3. Синхронные контакторы	373
13.5. Характеристика электрических цепей основных видов контактных машин	377
13.6. Аппаратура управления и контроля контактных машин	385
13.7. Технологические характеристики универсальных и специализированных контактных машин	388
Контрольные вопросы	400

ЧАСТЬ III. СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ СВАРКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДАВЛЕНИЯ

ГЛАВА 14. МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СВАРКИ	402
14.1. Холодная сварка	402
14.1.1. Сущность процесса	402
14.1.2. Технология холодной сварки	403
14.1.3. Оборудование	407
14.2. Сварка взрывом	408
14.2.1. Сущность процесса	408
14.2.2. Технология сварки взрывом	411
14.3. Магнитно-импульсная сварка	415
14.3.1. Сущность магнитно-импульсной сварки	415
14.3.2. Технология сварки	417
14.3.3. Оборудование	418
Контрольные вопросы	418
ГЛАВА 15. ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СВАРКИ	419
15.1. Клинопрессовая сварка	419
15.1.1. Сущность и параметры процесса	419
15.2. Сварка трением	421
15.2.1. Технология сварки	424
15.2.2. Оборудование	427
15.3. Ультразвуковая сварка	428
15.3.1. Сущность и параметры процесса	428
15.3.2. Технология сварки	431
15.4. Диффузионная сварка	435
15.5. Высокочастотная сварка	442
15.5.1. Оборудование для высокочастотной сварки	453
Контрольные вопросы	454
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	455

*Георгий Георгиевич ЧЕРНЫШОВ
Дмитрий Михайлович ШАШИН
Валентин Иосифович ГИРШ
Анатолий Петрович ИСАЕВ,
Николай Владимирович КОБЕРНИК
Борис Валентинович КОПАЕВ
Александр Владимирович МИЛОВАНОВ
Александр Михайлович РЫБАЧУК*

**ОБОРУДОВАНИЕ
И ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ
СВАРКИ МЕТАЛЛОВ
ПЛАВЛЕНИЕМ И ДАВЛЕНИЕМ**

Учебное пособие

Под редакцией
Г. Г. Чернышова и Д. М. Шашина

Издание третье, стереотипное

Зав. редакцией
инженерно-технической литературы *Е. В. Баженова*

ЛР № 065466 от 21.10.97
Гигиенический сертификат 78.01.10.953.П.1028
от 14.04.2016 г., выдан ЦГСЭН в СПб

Издательство «ЛАНЬ»
lan@lanbook.ru; www.lanbook.com
196105, Санкт-Петербург, пр. Ю. Гагарина, д. 1, лит. А.
Тел./факс: (812) 336-25-09, 412-92-72.
Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

Подписано в печать 20.10.20.
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 70×100 ¹/₁₆.
Печать офсетная. Усл. п. л. 45,50. Тираж 50 экз.

Заказ № 1336-20.

Отпечатано в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета
в АО «Т8 Издательские Технологии».
109316, г. Москва, Волгоградский пр., д. 42, к. 5.