



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И
ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Машины и автоматизация сварочного производства»
Кафедра «Теория и методика профессионального образования»

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

«СВАРОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ»

Авторы:

Ленивкин В.А., Киселёв Д.В., Софьяников В.А., Никашин А.И.

Под редакцией Ленивкина В.А.

Ростов-на-Дону, 2015

СВАРОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

АННОТАЦИЯ

В учебном пособии приведены разновидности процессов сварки давлением (холодная сварка, сварка взрывом, магнитноимпульсная, ультразвуковая, индукционная, диффузионная, сварка трением) плавлением (плавящим и не плавящимся электродом в различных защитных средах и под флюсом).

Рассмотрены физические сущности различных способов сварки давлением и плавлением. Указаны особенности применения процессов сварки для изготовления конструкций в различных отраслях производства. Описано оборудование, применяемое для различных процессов сварки. Учебное пособие предназначено для бакалавров направления «Машиностроение» по профилю «Технология и оборудование сварочного производства» 15.03.01 и может быть полезна для магистров направления 15.03.04 и аспирантов направления 15.06.01.

УДК 621.791.03 (075.8)

АВТОРЫ



д.т.н., профессор кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства»

Ленивкин В.А.



к.т.н. доцент кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства»

Софьянников В.А.



Инженер Национального аттестационного комитета контроля и сварки (НАКС)

Киселев Д.В.



доцент кафедры «Теория и методика профессионального образования»

Никашин А.И.





ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие

Глава 1 Основные данные физики твёрдого тела о строении конструкционных материалов

Глава 2 Принципиальные схемы методов сварки давлением и области применения

Глава 3 Сварочные процессы с использованием давления и температуры

Глава 4 Сварка в твёрдом состоянии

Глава 5 Диффузионная сварка (ДС) (P, T, A, f, t-процессы)

Глава 6 Электрическая контактной сварки и ее разновидности

Глава 7 Электродуговая сварка плавления

Глава 8 Выбор источников питания для дуговой сварки

Список использованных источников

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ

Интенсивное развитие всех отраслей промышленности передовых стран мира при изготовлении неразъёмных конструкций в основном связано с применением новых технологических процессов на базе различных способов сварки.

Настоящее учебное пособие написано в соответствии с учебной программой высших учебных заведений по курсу «Сварочные процессы и оборудование» и предназначено для бакалавров направления «Машиностроение» по профилю «Технология и оборудование сварочного производства» 15.03.01 и может быть полезна для магистров направления 15.03.04 и аспирантов направления 15.06.01.

При изложении материала учебного пособия предполагается, что студенты усвоили общенаучные дисциплины: физику, математику, основы электротехники. В результате изучения курса «Сварочные процессы и оборудование» будущие бакалавры должны уяснить физическую сущность различных способов сварки и рациональное их применение в технологических процессах, при изготовлении деталей и конструкций различных машин и механизмов.

Цель настоящего учебного пособия дать необходимые сведения о современных сварочных процессах (давлением и плавлением), которые позволят выбирать необходимые технические средства и технологические процессы для изготовления продукции в различных отраслях производства с заданными эксплуатационными характеристиками при использовании современных способов сварки и сварочного оборудования.

ГЛАВА 1 ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ ФИЗИКИ ТВЁРДОГО ТЕЛА О СТРОЕНИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1 ВИДЫ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ СВЯЗЕЙ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ И МОНОЛИТНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

Монолитность сварных соединений твердых тел обеспечивается атомно-молекулярными связями между элементарными частицами соединяемых веществ.

Твердое тело представляет собой комплекс атомов, находящихся во взаимодействии. Тип химической связи атомов и характер их взаимного расположения определяют физико-химические и прочностные свойства твердого тела. Для рассмотрения природы сварного соединения, необходимо вспомнить некоторые сведения из физики твердого тела.

Характер и величина энергии (прочность) элементарных связей зависят от природы вещества и типа кристаллической решетки твердого тела. Согласно современным представлениям, химическая связь атомов возникает в результате движения электронов внешних (валентных) оболочек атома в поле между ядрами. Каждый из этих электронов, проникая, например, в поле двух ядер, принадлежит уже обоим атомам. Химические силы по своей природе являются электромагнитными и действуют на расстоянии порядка 10^{-8} см = 1 Å.

В химии различают *четыре типа элементарных связей*: ковалентную, ионную, межмолекулярную (Ван-дер-Ваальса) и металлическую. В зависимости от преобладающих элементарных связей кристаллы также различают соответственно по четырем группам: атомные, ионные, молекулярные и металлические.

Наиболее типичными химическими связями являются первые две связи: ковалентная и ионная. Монолитность сварных соединений твердых тел обеспечивается появлением атомно-молекулярных связей между элементарными частицами соединяемых веществ.

Ковалентную химическую связь в литературе часто называют валентной, атомной или обменной связью. Она может образоваться путём взаимодействия или «спариванием» валентных электронов. Сильная ковалентная связь с энергией порядка 10^5 Дж/моль определяет высокую температуру плавления и прочность кристаллов. Ковалентной связью обусловлены структуры так называемых атомных кристаллов – алмаза, кремния, германия, серого олова и т.д.

Число образуемых атомами ковалентных связей в первом приближении может служить количественной мерой валентности. Каждая ковалентная связь между атомами образуется при спаривании их валентных электронов (с противоположными спинами). Поскольку валентные возможности атомов ограничены, важнейшим свойством ковалентной связи является ее насыщаемость.

При сварке прочные связи ковалентного типа устанавливаются не только в атомных кристаллах, но и при соединении металлов с металлоидами, оксидами металлов, а также полупроводниками или интерметаллидами, обладающими полупроводниковыми свойствами.

Интерметаллиды – соединения типичных металлов с металлами, имеющими слабые металлические свойства.

Когда соединяемые вещества способны к донорно-акцепторному взаимодействию, устанавливается так называемая координационно-ковалентная связь. Примером служит соединение основных оксидов с кислотными, таких, как $\text{Ca}^{+2} \text{O}^{-2}$, где ион кислорода является донором по отношению к атому, образующему кислотный оксид, такой, как $\text{Si}^{+4} \text{O}_2^{-4}$. При непосредственном соединении металлов с керамиками, имеющими в составе кислотные оксиды, координационно-ковалентная связь легче образуется тогда, когда на поверхности металла создан тонкий слой нижних основных оксидов, обладающих донорными свойствами.

Ионная, или гетерополярная, связь типична для молекул и кристаллов, образованных из разных ионов (анионов и катионов). Образование положительного катиона – результат ионизации атома. Мерой прочности связи электрона в атоме может служить потенциал ионизации атома.

Типичный представитель ионных кристаллов – соль NaCl . Образование отрицательных анионов происходит в результате присоединения электрона к атому. Мерой способности к такому присоединению служит так называемое сродство к электрону. Ионная связь также является сильной, с энергией около $10^5 \dots 10^6$ Дж/моль. Особенностью ионной связи является отсутствие насыщенности и пространственной направленности.

Представления о чисто ковалентной и чисто ионной связи в значительной степени идеализированы. Часто встречаются промежуточные случаи. Если при ионной связи один атом целиком отдает электрон другому, а при ковалентной связи каждый электрон принадлежит поровну обоим связанным атомам, то в промежуточных случаях возможны связи с любым «процентом ионности».

Кроме двух наиболее типичных химических связей – ковалентной и ионной – различают молекулярные связи за счет универсальных сил Ван-дер-Ваальса и металлические связи.

Силы Ван-дер-Ваальса действуют между любыми атомами и молекулами, но они очень малы (порядка 10^3 Дж/моль). Поэтому молекулярные кристаллы, обусловленные этими силами (твердые инертные газы, молекулы кислорода, азота и т.д.), отличаются весьма низкой температурой плавления ($\text{He} - 1,8$; $\text{Ar} - 40$ К). Образование прочных структур обусловлено, главным образом, сильными типично химическими связями, например, ковалентной, а силы Ван-дер-Ваальса служат лишь небольшой «добавкой». Силами Ван-дер-Ваальса обусловлены обычно адгезионные связи при склеивании, смачивании твердых тел жидкостями и т. п.

Металлические связи образуют структуры путем взаимодействия положительных ионов решетки (атомных остатков) и делокализованных, обобществленных электронов. Эти связи являются гомеополярными. Они, по существу, не относятся к химическим связям, и понятие металлической связи можно считать качественным, так как металлы обычно не имеют молекулярного строения, а их атомы соединяются в кристаллические образования. Носителем свойств вещества в этом случае является не молекула, а фаза. Этот вид связи обуславливает высокую прочность, пластичность и электропроводность металлов. Энергия связи –

около 10 Дж/моль. Прочная металлическая связь наблюдается при образовании интерметаллидов и некоторых твердых растворов. Одна из ее особенностей – отсутствие насыщения, определяемого валентностью соответствующих атомов.

Металлическая связь по своей природе имеет значительное сходство с ковалентной связью. В обоих случаях электронные орбиты сливаются, но в металле происходит обобщение не отдельных, а всех валентных электронных орбит. При этом устанавливаются общие уровни энергии во всем объеме кристалла. Число уровней будет одного порядка с числом атомов в данном объеме металла. Уровни весьма близки между собой и образуют энергетические полосы или зоны, которые иногда рассматривают как расщепление валентных уровней (орбит) отдельных атомов.

Поскольку в металле существует как бы «облако» обобщенных электронов, металлическая связь не направлена в пространстве, как ковалентная, не насыщаемая и допускает большее смещение атомов, чем другие типы связей. Этим обуславливается высокая пластичность металлических кристаллов по сравнению с валентными или ионными кристаллами.

Все четыре типа связи в кристаллах (атомных, ионных, молекулярных и металлических) *редко существуют в чистом виде*. Обычно встречаются *сочетания связей* одновременно, причем, как уже отмечалось, молекулярные связи являются слабыми по сравнению с остальными тремя. Следует также отметить, что поверхности твердых тел в атмосферных условиях обычно инертны, так как валентности их атомов насыщены связью с атомами окружающей среды. Примером насыщения может служить окисление веществ в газовой среде. На поверхности могут также идти процессы типа физической адсорбции, обусловленные силами Ван-дер-Ваальса.

Схема основных видов адсорбционных слоев на поверхности металла может быть проиллюстрирована рисунком 1.1.

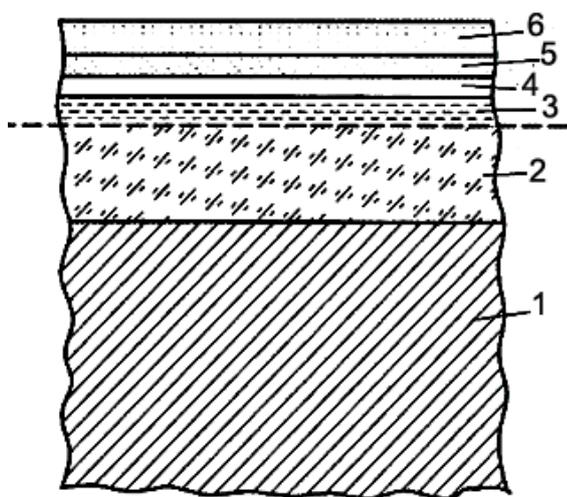


Рис. 1.1. Схема основных видов адсорбционных слоев на поверхности технического металла: 1 – первичная объемная структура металла; 2 – зона деформированного металла; 3 – слой окислов металла; 4 – адсорбционный слой газов; 5 – адсорбционный слой воды; 6 – адсорбционный слой полярных молекул органического вещества (смазки)

Непосредственно над ювенильной (физически и химически чистой) поверхностью металла обычно находится слой его оксидов, имеющий толщину нескольких ангстремов ($1\text{Å} = 10^{-8}\text{ см}$). На поверхности окисленного слоя в зависимости от

внешних условий могут присутствовать адсорбционные слои газов (воздуха), адсорбционные слои молекул воды, адсорбционные слои полярных и неполярных молекул органических веществ (жиры, смазка).

При сварке плавлением наличие этих тонких слоев принципиального значения не имеет, поскольку они вместе с основным металлом переплавляются и удаляются из жидкой сварочной ванны за счет металлургических реакций. При сварке давлением, их удаление перед сваркой или в ходе сварки представляет определенную проблему. Только их полное удаление создает предпосылки для установления нормальных химических связей в контакте кристаллических решеток свариваемых материалов. Большое значение при этом приобретает тип, ориентация и параметры кристаллических решеток, в связи с чем целесообразно рассмотреть эти вопросы.

1.2 КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ РЕШЕТКИ МЕТАЛЛОВ

Кристаллическая решетка представляет собой закономерное расположение атомов в пространстве относительно друг друга. Атомы не являются неподвижными даже при температуре абсолютного нуля Кельвинов, а совершают колебательные движения около мест устойчивого равновесия, называемых узлами кристаллической решетки. Наименьший комплекс атомов, путем многократного повторения (трансляции) которого можно воспроизвести кристаллическую решетку, называется элементарной ячейкой. Как доказал выдающийся русский кристаллограф Е.С. Федоров, (XIX в.) существует 230 типов геометрического расположения атомов в кристаллах. Однако в металлических кристаллах обычно наблюдаются три типа решеток. объемно-центрированная кубическая решетка (ОЦК), гранецентрированная кубическая решетка (ГЦК) и гексагональная плотно упакованная решетка (ГПУ).

Решетка ОЦК характерна, например, для железа и сталей при комнатной температуре, хрома, β -титана и его сплавов, *W, Mo, Nb, Ta*; ГЦК решетка – для γ -железа (при $T > 911$ °С), *Ni, Cu, Al, Ag, Au*; ГПУ решетка – для α -титана (при $T < 882$ °С), *Co, Mn, Zn*. Элементарные ячейки этих решеток показаны на рисунке 1.2.

Кристаллические решетки отличаются друг от друга следующими характеристиками: параметр a – расстояние между центрами атомов вдоль ребра куба (для кубических решеток); для ГПУ решетки принято 2 параметра – a и c (рис.1.2, в); координационным числом; (**КЧ**) – числом ближайших соседей выбранного атома, находящихся на одинаковом расстоянии от него (для ОЦК КЧ – 8, для ГЦК – 12, для ГПУ – 12); плотностью упаковки (для ОЦК - 0,68, для плотно упакованных решеток ГЦК и ГПУ – 0,74).

ПУ – это отношение объема, занятого атомами, ко всему объему кристаллической решетки; 0,74 – максимально возможная величина. Иногда пользуются и такой характеристикой, как количество атомов, приходящихся на элементарную ячейку. Например, для ОЦК решетки: 8 угловых атомов, каждый из которых принадлежит 8 элементарным ячейкам, дают $1 \left(8 \times \frac{1}{8} = 1 \right)$ плюс 1 центральный атом.

Итак, всего 2 атома на элементарную ячейку. Для ГЦК решетки: вклад каждого углового $8 \times \frac{1}{8}$, всего 1 от 8 угловых плюс 6 атомов в центре граней, каждый из которых принадлежит 2 ячейкам, дают $6 \times \frac{1}{2} = 3$. Всего на ячейку $1+3 = 4$. Для ГПУ тоже 4.

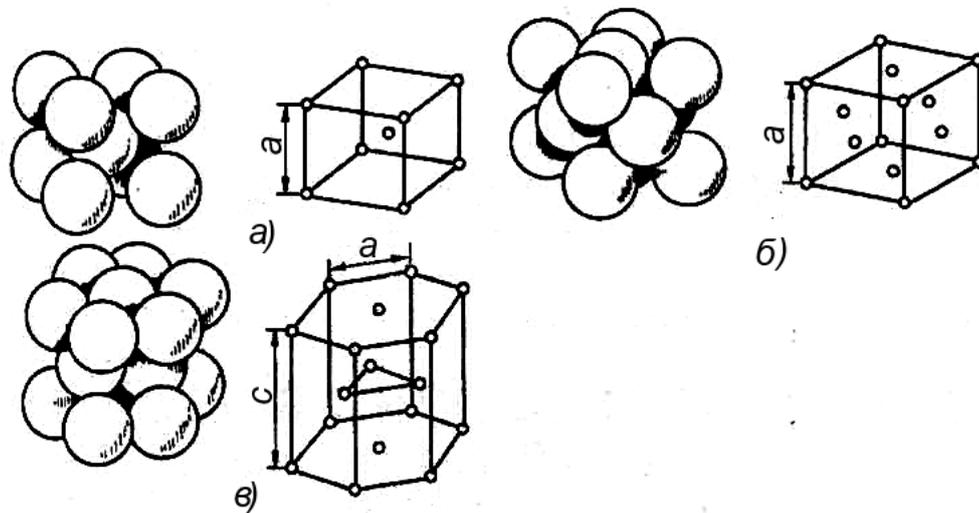


Рис. 1.2. Кристаллические решетки (слева изображение в виде плотно упакованных шаров-атомов): а – объемноцентрированная кубическая (ОЦК); б – гранецентрированная кубическая (ГЦК); в – гексагональная плотно упакованная (ГПУ)

Анализ рисунка 1.2 показывает, что кристаллографические плоскости и направления упакованы атомами неравномерно. Имеются более и менее плотно упакованные кристаллические решетки, что сильно влияет на вектор предпочтительной пластической деформации. Например, в плоскости передней грани ОЦК атомы находятся на расстоянии a , т.е. параметра кристаллической решетки, а в диагональной плоскости, в которой находится центрирующий куб атом, – на расстоянии $a \times \frac{\sqrt{2}}{2}$, то есть, вторая плоскость упакована плотнее, чем первая. Аналогично и в отношении кристаллографических направлений. Например, в направлении ребра куба атомы расположены на расстоянии a друг от друга, а в направлении пространственной диагонали – на расстоянии $a = \frac{\sqrt{3}}{2}$. Поэтому для обозначения кристаллографических плоскостей и направлений в решетке принята система индексов Миллера.

Контрольные вопросы

1. Укажите типы химических связей.
2. Дайте определение понятия «интерметаллиды».
3. Дайте определение понятия «ионная или гетерополярная связь»
4. Что такое «силы Ван-дер-ваальса»
5. Когда и как действуют металлические связи?

ГЛАВА 2 ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ МЕТОДОВ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

2.1 МЕТОДЫ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ. ОСНОВНЫЕ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

При различных методах сварки давлением неразъемные соединения металлов, металлов с неметаллическими материалами и неметаллов друг с другом осуществляются в твердом состоянии в результате деформационного или деформационного воздействия на соединяемые материалы в зоне контакта. Поэтому основными технологическими параметрами процессов сварки являются давление (P) и температура (T).

Под действием этих параметров соединяется большинство конструктивных одноименных и разноименных металлов. Под действием давления P качественные соединения металлов формируются при холодной сварке (ХС), сварке взрывом (СВз), магнитоимпульсной сварке (МИС) и вакуумнотермической магнитоимпульсной обработке (ВТМИО). При этих методах определяющим фактором образования таких соединений является взаимное деформационное взаимодействие в зоне контакта. Эти процессы можно отнести к P -процессам.

При ударной сварке в вакууме (УСВ) и индукционной сварках (ИС) соединения металлов образуются за счет уже термодформационного воздействия, так как металлы перед контактированием нагреваются до пластического состояния в зоне контакта. Эти методы сварки относят к P , T -процессам. ИС успешно применяется для сварки пластмасс и синтетических тканей.

Для соединения металлов и металлов с неметаллическими материалами начинают применяться процессы сварки с дополнительными интенсифицирующими воздействиями, в том числе при пониженных температурах и давлениях, ультразвуком, циклическими изменениями давления и температуры, электростатическими и магнитными полями, крутильными колебаниями, радиационным и ударным воздействием и др. Параметры этих воздействий обозначают их f -параметрами.

Сварка давлением применяется с использованием различных защитных сред: вакуума, водорода, растворов солей и др. и определяется P , T , A -параметрами. Наиболее характерным примером данной группы процессов является прокатка металлов в вакууме. К этой группе процессов относится термокомпрессионная сварка (ТКС).

Одним из направлений развития техники в последнее десятилетие является разработка таких способов сварки, которые позволяют соединять тугоплавкие металлы, металлы с конструктивными функциональными неметаллическими материалами (керамикой, ферритами, ситаллами, стеклами, полупроводниками и др.) при пониженных температурах и давлениях. При создании современных приборов и устройств актуальной становится решение проблемы соединения этих материалов друг с другом. Разработка таких способов сварки требует дополнительных интенсифицирующих параметров и защитных средств. Например, использование

для активации процесса взаимодействия взрывающихся прослоев (СВзП) в вакууме. Этот метод позволяет соединять при температурах 200...300 °С в вакууме практически все металлы и металлы с неметаллами, керамик с ферритами, стеклом с полупроводниками, драгоценных камней друг с другом. Поэтому сварку материалов через взрывающиеся прослойки возможно выделить в отдельную группу Р, Т, А, f-процессов. К этой же группе можно отнести и сварку импульсным электрическим разрядом в жидкости (СИЭЖ).

Многие способы сварки давлением позволяют получать качественные соединения практически мгновенно. При некоторых способах сварки, в частности диффузионной, время воздействия технологических параметров t существенно влияет на кинетику и полноту протекания физико-химических процессов в контактной зоне, ответственных за получение качественных соединений.

Диффузионная сварка (ДС) является наиболее универсальным процессом по возможности применения всех рассмотренных основных (Р, Т) и дополнительных параметров (f, А), и с учетом времени их воздействия t может быть отнесена к Р, Т, А, f, t – процессам, т.е. она является наиболее универсальным и разносторонним способом сварки.

Этот способ предложен и разработан в Советском Союзе Н.Ф. Казаковым. Его отличительные особенности следующие:

- сварка как металлических, так и неметаллических материалов ведется в твердом состоянии при температурах 0,5...0,9 температуры плавления более легкоплавкого из соединяемых материалов;
- прикладываемое к свариваемым деталям давление не превышает обычно величины предела текучести более пластичного из соединяемых материалов, что позволяет получать прецизионные соединения;
- изотермическая выдержка под давлением при температуре сварки составляет, как правило, минуты – десятки минут. В этих условиях достаточно активно протекают диффузионные процессы в контактной зоне;
- сварка ведется в вакууме, в восстановительных или защитных средах, что исключает окисление поверхностей и создает условия для их очистки при сварке.

Основным достоинством ДС является ее способность соединять без применения припоев, флюсов и без ограничения соотношения толщин разнообразные металлические материалы, а также металлы с керамикой, стеклами, керметами и др. Это позволяет изготавливать узлы различных приборов, а также получать биметаллы, триметаллы и более сложные композиционные материалы. ДС позволяет успешно решить проблему получения сварных соединений по всем характеристикам (прочность, пластичность, термостойкость, электропроводность), идентичным исходным материалам.

ДС позволяет соединять детали и узлы с высокой размерной точностью по плоской, конической, сферической и сложной рельефной поверхностям. Применение ДС взамен пайки позволяет существенно повысить качество и долговечность приборов и устройств в различных отраслях техники.

Разделение сварки давлением на отдельные группы процессов по технологическим параметрам является достаточно условным. Так как наряду с основными параметрами, определяющими процесс взаимодействия, в последнее время применяются при большинстве сварок все более разнообразные методы дополнительной интенсификации. Например, при СТ используют ротационное воздействие, при ДС – различные прослойки из перфорированных материалов, циклическое изменение давления и температуры, радиационное воздействие и др. Тем не менее, каждый из указанных P , T , f , A и t -параметров может оказывать воздействие на процессы соединения материалов в твердом состоянии, повлиять на соотношение этих параметров в зависимости от свойств соединяемых материалов, вызвать необходимость создания принципиально нового перспективного оборудования, в котором предусмотрено сочетание и наличие этих параметров, определить вид получаемого соединения, его эксплуатационные и экономические характеристики. Все эти параметры могут служить основой для классификации методов сварки давлением по видам вводимой энергии и дополнительных интенсифицирующих параметров энергетического и технологического взаимодействия при соединении металлов, металлов с неметаллами и даже неметаллических материалов друг с другом.

Контрольные вопросы

1. Почему основными технологическими параметрами процессов сварки являются давление (P) и температура (T)?
2. Какие применяются защитные среды для различных видов сварки давлением?
3. Способом сварки давлением какие можно соединять материалы?

2.2 Р-ПРОЦЕССЫ

Способы сварки с приложением давления (Р-процессы): холодная, взрывом, магнитноимпульсная сварки и вакуумно-термическая магнитноимпульсная обработка. Активация соединения при этих способах осуществляется только за счет приложенного давления.

2.2.1 ХОЛОДНАЯ СВАРКА

Холодная сварка (ХС) – способ соединения металлических деталей при комнатной температуре (иногда и отрицательной). Холодной сваркой соединяют металлы, имеющие высокую пластичность при комнатной температуре (Al, Au, Ag, Cu, Ni, Pb, Sn и др.), [1].

Для получения герметичных соединений без предъявления высоких требований к их механической прочности ХС может применяться при соединении меди с коваром и меди со сталью. В электромашиностроительной промышленности возникает необходимость в оконцевании выводов алюминиевых токопроводящих деталей медью. ХС удобно применять для соединения деталей, имеющих элект-

Сварочные процессы и оборудование

трическую изоляцию, и для работы в огне и взрывоопасных помещениях. Пример оборудования для промышленной холодной сварки приведен на рис. 2.1 и рис. 2.2.



Рис. 2.1. Примеры оборудования для промышленной холодной стыковой сварки



Рис. 2.2. Установки холодной сварки Трех - YouTube: а – шовная сварка; б – точечная сварка

Сварочные процессы и оборудование

Усилие в 120 тонн позволяет на подобных машинах выполнять сварку:

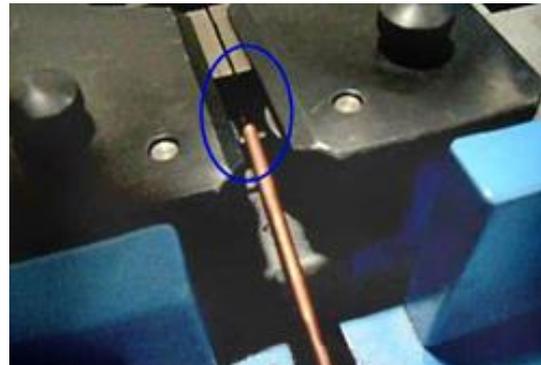
- с алюминиевым сечением (от 100 до 1500 мм кв);
- с медным типом сечения (от 100 до 1000 мм кв);
- с комбинированным – медно-алюминиевым сечением (100 – 1000 мм кв).

Для соединения деталей ХС применяют различные схемы приложения давления Р и схемы соединения: точечной сваркой при одностороннем и двухстороннем деформировании с предварительным и окончательным деформированием и шовной сваркой.

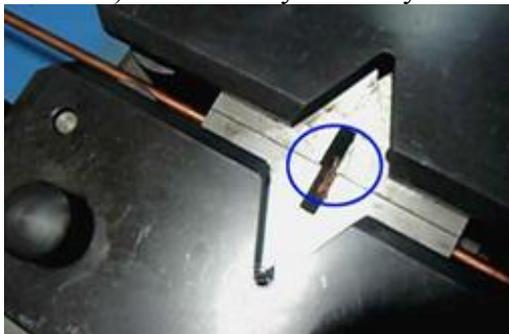
Работа на машинах для холодной стыковой сварки представлена на рис.2.3.



1) Включить установку



2) Вставить проволоку или пруток в пуансон



3) С помощью блока управления произвести сжатие проволоки



4) Извлечь сваренную проволоку



5) Удалить облой образовавшийся в процессе холодной сварки

Рис. 2.3. Последовательность работы на машине для холодной стыковой сварки

Точечной сваркой соединяют детали внахлестку без предварительного или с предварительным сжатием свариваемых деталей (рис. 2.4, 2.5). Точечная сварка без предварительного сжатия деталей может выполняться путем их двустороннего (рис. 2.4, а) или одностороннего сжатия (рис. 2.4, б).

Сварочные процессы и оборудование

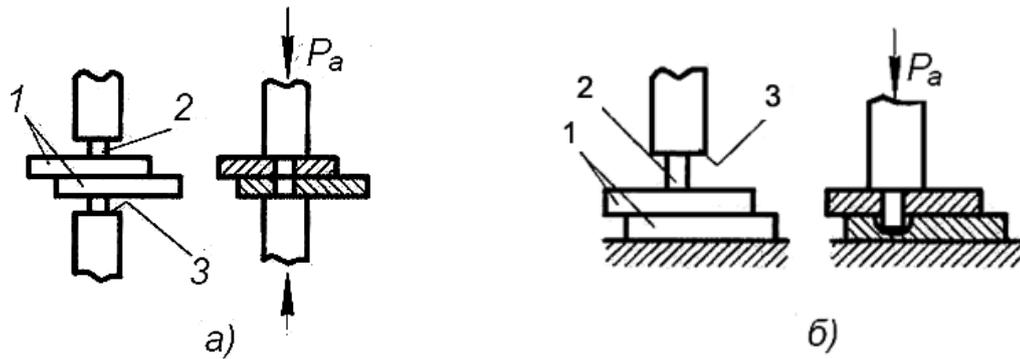


Рис. 2.4. Схема точечной сварки без предварительного зажатия при двустороннем (а) и одностороннем (б) деформировании: P_{oc} -усилие

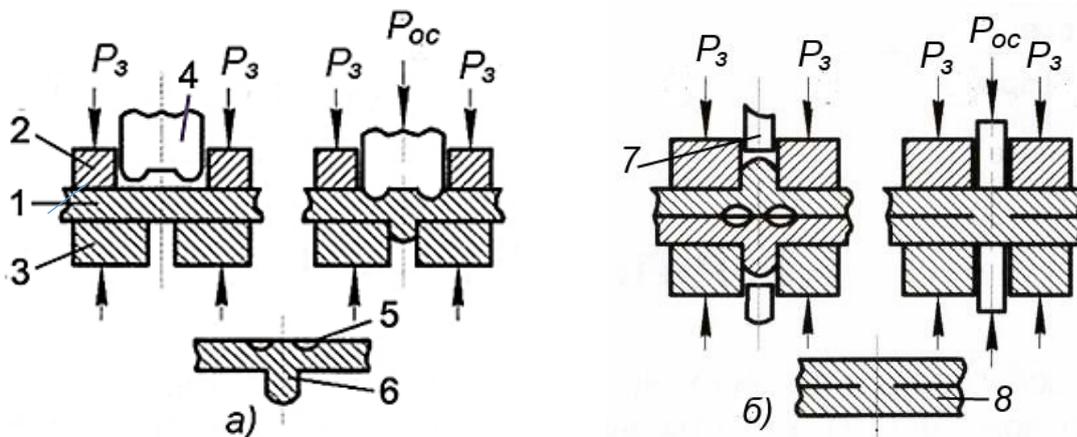


Рис. 2.5. Схема точечной сварки с предварительным (а) и окончательным (б) деформированием

Пуансон имеет выступ (2) и опорную часть (3) большого сечения (рис. 2.1). Под действием усилия (P_{oc}) рабочий выступ внедряется полностью в деталь (1), где и образуется сварная точка. Усилие передается деталям не только через рабочие выступы, но и через опорные части.

На рисунке 2.6 показаны возможные формы свариваемых точек.

Площадь сварной точки, как правило, равна площади сечения вдавливаемой части пуансонов, но при определенных условиях может ее превышать.



Рис. 2.6. Возможные формы сварных точек

Машина для холодной точечной сварки приведена на рис. 2.7.

Сварочные процессы и оборудование



Рис. 2.7. Машины для холодной точечной сварки

К технологическим параметрам точечной сварки следует относить также количество и расположение сварных точек.

Сварка с предварительным сжатием деталей позволяет избавиться от вмятин в металле при точечной сварке. Эта схема предполагает наличие двух переходов при сварке – подготовительной и собственно сварочной.

Вначале деталь 1 зажимают между двумя прижимами 2 и 3, имеющими отверстия (рис. 2.5, а). Отверстие в верхнем прижиме 2 предназначено для перемещения специального пуансона 4, а в нижнем – 3 для течения выдавливаемого металла, образующего выступ. При вдавливании пуансона 4 в деталь 1 на верхней ее поверхности образуется углубление 5, в нижней части – выступ 6.

Аналогично подготавливают вторую деталь. Затем соединяемые поверхности деталей зачищают щетками, складывают и помещают в штамп (рис. 2.6, б). Их зажимают снова, после чего к выступам через сварочные пуансоны 7 прикладывают давление P . Углубления в процессе деформации заполняются металлом за счет материала выступов, в результате получается соединение внахлестку двух плоских деталей 8 без присущих холодной точечной сварке вмятин – следов вдавливания пуансонов. Этим способом можно получать соединения не только в виде круглых точек, но и кольцевых швов или швов в виде волнистых линий.

Шовная холодная сварка осуществляется двумя основными способами: последовательным выполнением перекрывающихся точек при непрерывном выполнении всего сварного шва или одновременном соединении деталей по всей длине шва (рис. 2.8). В первом случае сварка *осуществляется вращающимися роликами*. Подготовленные к сварке детали 1 складываются зачищенными поверхностями, помещаются между роликами 2 и 3, сдавливаются до полного проникновения в металл рабочих выступов 4. Затем ролики приводятся во вращение. При этом соединяемые детали перемещаются, и происходит их сварка по шву.

Холодная сварка роликами бывает односторонняя (рис. 2.8, а) и двусторонняя (рис. 2.8, б).

Односторонняя сварка выполняется роликами, ролик 2 имеет рабочий выступ 4, а ролик 3 гладкий и служит лишь опорой. Такая схема сварки применяется, при соединении деталей из одного и того же материала. Разновидностью сварки роликами является шовно-точечная и соединение по всей длине шва.

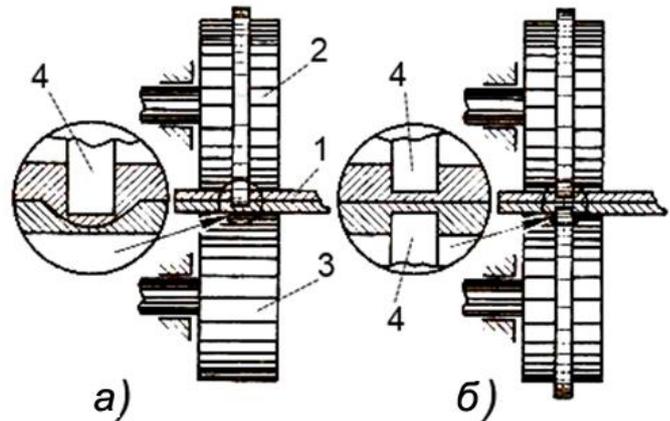


Рис.2.8. Схема шовной холодной сварки: а – с односторонним; б – с двусторонним деформированием

Сварка с **двусторонним деформированием** осуществляется вдавливанием пуансонов подобно точечной сварке. Пуансоны имеют рабочие выступы 4 кольцевой формы. Как и при точечной сварке, применяется одностороннее или двустороннее деформирование металла. Особое положение занимает шовная сварка, позволяющая изготавливать изделие без отбортовки, а также соединять трубы с расположенными внутри них перегородками.

Машины для холодной шовной сварки представлены на рис. 2.9.

Сварка тавровых соединений – способ холодной сварки двух деталей. Одна из заготовок, как правило, плоская, а другая (привариваемая) может быть прутком, полосой или иметь иную форму. Получены соединения при диаметре прутка до 30 мм, толщине плоской детали до 20 мм.

Сварка сдвигом – соединяют полосы из алюминия, меди, армкожелеза, никеля толщиной до 4...8 мм.

Сварочные процессы и оборудование



Рис. 2.9. Машины для холодной шовной сварки (относительно длины свариваемых деталей):
а – продольных швов; б – поперечных швов

При этом способе сварки относительный сдвиг деталей осуществляется под действием тангенциальных усилий (сварка сдвигом (рис. 2.10).

При ХС наблюдается интенсивный наклеп металла. В силу этого прочность сварного соединения, выполненного без нарушения технологического режима, выше, чем у основного материала. Отсутствие значительного нагрева практически исключает возможность появления хрупких интерметаллидных прослоек (например, при сварке алюминия с медью), обеспечивая тем самым высо-

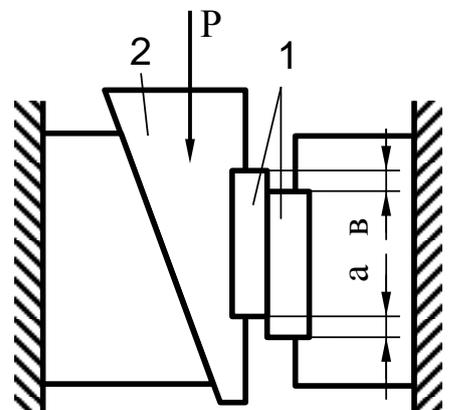


Рис. 2.10. Сварка сдвигом: 1 – детали; 2 – клиновое приспособление: $a = b = 10 \text{ мм}$

кую 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. По сравнению с соединениями, выполненными другими методами, простота подготовки деталей к сварке, легкость контроля параметров режима, отсутствие вспомогательных материалов, газо- и тепловыделений, возможность дистанционного управления и быстрота процесса позволяют легко автоматизировать ХС. Процесс не требует высокой квалификации сварщика-оператора. Удельные затраты энергии при сварке на порядок меньше, чем при сварке плавлением. Применение этого метода способствует улучшению гигиенических условий на производстве.

Сварка встык – подлежащие сварке стержни 1 (рис. 2.11) зажимают в зажимах (2). Концы свариваемых деталей выпускают из зажимных губок на определенную длину, называемую вылетом.

При осадке правый и левый зажимы сближают до соприкосновения, и острый край, зажимая, обрубают выдавленный металл.

Таким способом свариваются стержни и проволока круглого квадратного и прямоугольного сечения, полосы и т.п. Место сварки получается чистым и не требует последующей обработки. Металл в зоне сварки упрочняется вследствие наклепа, и разрыв при испытаниях происходит всегда вне зоны сварки.

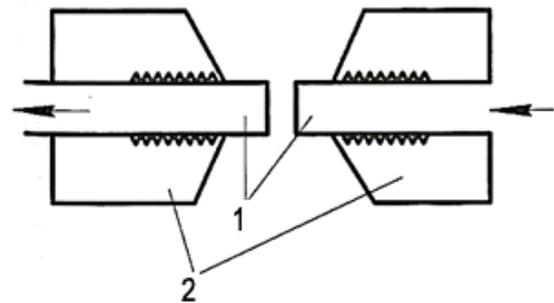


Рис. 2.11. Схема холодной сварки встык

Технология сварки. Для получения прочного и надежного неразъемного соединения деталей ХС важное значение имеет способ обработки поверхностей свариваемых деталей. Это механическая обработка вращающимися щетками из стальной, латунной или никелевой проволоки диаметром 0,2...0,3 мм. Диаметр щеток может быть от 50 до 200 мм, частота вращения 25...50 с, линейная скорость на поверхности щеток 15...60 м/с. Зачистка производится до получения ровной матовой поверхности. Для соединения алюминия и его сплавов наиболее эффективен способ подготовки свариваемых поверхностей – обрезка концов деталей перед сваркой. Срез должен быть перпендикулярным к продольной оси (особенно для проводов).

Широко применяется стыковая сварка с многократной осадкой торцов без их подготовки. При этом каждый раз устанавливается вылет соединяемых деталей в губках сварочной машины.

Весьма эффективен термический способ подготовки путем прокаливания деталей при температуре 300...400 °С на воздухе. Однако для медных деталей этот способ неприменим.

Возможны и химические способы подготовки путем обезжиривания различными растворителями. Однако эти способы нетехнологичны, так как требуют большого количества дорогих растворителей.

Очистка предварительным нанесением твердых пленок. Никелирование – эффективный способ при ХС пар медь-медь, медь-ковар в массовом производстве полупроводниковых приборов. Оптимальная толщина покрытия 18...21 мкм.

Эффективными способами подготовки деталей могут быть УЗ-очистка, отжиг деталей в водороде или вакууме (в электронной промышленности).

Основным параметром процесса ХС является пластическая деформация металла в зоне сварки. Она зависит от свойств соединяемых металлов, подготовки поверхности и типа соединения. Как правило, величины деформаций значительны и составляют 60...90 %.

Для определения необходимого давления при сварке, например, нахлесточных соединений, пользуются схемой (рис. 2.12) и уравнением Е.П. Унксова.

$$p = \sigma_T \left(1 + \frac{d}{6(\delta - h)} - \ln \left(\frac{D}{d} \right) \right),$$

где: σ_T – предел текучести металла; δ – толщина листа; d – диаметр пуансона; h – глубина вдавливания; D – диаметр зоны деформации металла.

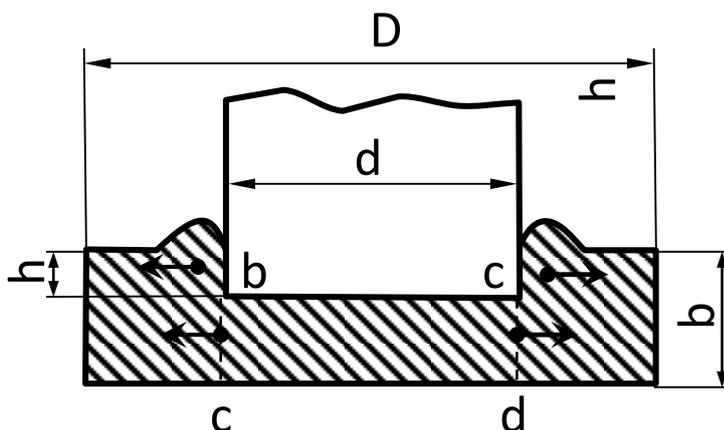


Рис. 2.12. Схема вдавливания пуансона в металл

Для сварки двух цилиндрических заготовок диаметром d давление определяется уравнением:

$$p = \sigma_T \left(1 + \frac{d}{6h} \right)$$

где, h – длина части заготовок, которая деформируется (расстояние между зажимами заготовок).

Течение металла и соответственно условия сварки зависят от отношения диаметра d или ширины b пуансона к толщине листа δ . Максимальное течение наблюдается соответственно при

$$d/\delta = 2 \text{ и } b/\delta = 1.$$

Сплавы свариваются хуже, чем чистые металлы. Например, если чистый алюминий имеет отличную способность к сварке, то алюминиевые сплавы свариваются плохо. Для приближенной оценки способности сплавов к сварке можно пользоваться величиной их твердости. Обычно с повышением твердости способность к сварке ухудшается, и необходимая минимальная деформация металла ε_{\min}

возрастает, так как снижаются интенсивность пластического течения металла в зоне контакта и активация поверхностей.

Высокие пластические деформации при ХС значительно упрочняют металл, поэтому прочность стыковых соединений выше прочности основного металла. При сварке внахлест прочность соединений определяется прочностью сварной точки и возможностью вырыва точки в месте среза.

При шовной сварке алюминия удельное давление пуансона применяется обычно 300...600 МПа, для меди – 2000 МПа.

Для сварки разнородных металлов встык вылет заготовок из более твердого металла выбирается большим. Например, при сварке алюминия с медью вылет меди на 30...40 % больше алюминиевого стержня.

Технология сварки может включать в себя и такие операции, как удаление отпая при сварке встык и контроль качества сварки. Иногда после сварки применяют подогрев.

Оборудование для ХС применяют как специализированное, так и прокатное, и прессовое. Как правило, специализированное оборудование можно перенастраивать для сварки разных деталей, изменяя пуансоны, штампы и др. Наибольшее количество такого оборудования разработано в ВНИИЭСО.

Передвижная пневмогидравлическая установка типа УГХС-5 предназначена для оконцевания медными флажками выводов громоздких алюминиевых обмоток, и приварки медных отводов к алюминиевым обмоткам галетного типа. Например, к первичным обмоткам трансформаторов машин контактной сварки в процессе их намотки. Эта установка используется также для соединения точечной сваркой алюминиевых шин толщиной до 5 мм.

Установка УГХС-10 разработана для оконцевания медными флажками таких алюминиевых обмоток и других токопроводящих деталей, которые могут подаваться к неподвижной сварочной головке стационарной установки.

Машина МХСА-50 предназначена для армирования деталей с размерами армируемых участков до 60×60 мм². Машина МХСА-120 разработана для армирования медными накладками выводов алюминиевых обмоток, шин, линейных зажимов и других деталей с размерами армируемого участка до 120×180 мм.

На заводе «Электрик» изготовлен полуавтомат типа МХСК-1 для герметичного соединения алюминиевых корпусов диаметром до 50 мм, а также прямоугольных сечением до 45×45 мм при предельной высоте корпусов 85 мм.

Разработана гидравлическая установка для герметизации ХС кристаллических выпрямителей, диодов, транзисторов, осцилляторов и других электронных приборов в вакууме порядка 10⁻⁴ Па.

Предусмотрена возможность в случае надобности после откачки заполнять камеру инертным газом для ХС в контролируемой среде. Производительность установки при сварке в условиях вакуума – 60 приборов в час.

Машина МСХС-5-3 является усовершенствованным вариантом ранее разработанной машины МСХС-5. Она предназначена для стыковой холодной сварки алюминиевых приборов сечением 2...30 мм², медных и алюминиевых с медными – сечением 2-20 мм².

Машина МСХС-8 предназначена для стыковой холодной сварки алюминиевых проводов сечением 3...50 мм². Минимальный диаметр свариваемых на этой машине проводов – 2 мм, максимальный – 7 мм.

Машина МСХС-30 изготовлена для сварки встык медных контактных проводов сечением до 100 мм². Она предназначена также для сварки алюминия и меди с алюминием сечением до 300 мм².

Машина МСХС-35 предназначена для стыковой холодной сварки алюминиевых проводов сечением 20...300 мм², медных 20...200 мм².

Машина МСХС-80 предназначена для стыковой сварки алюминия сечением 100...10000 мм², меди – 100...600 мм² и меди с алюминием сечением 100...800 мм².

Промышленное применение холодной сварки (ХС). На рисунках 2.13...2.17 показаны примеры применения ХС. Наиболее широко холодная сварка применяется в электротехнической промышленности. С ее помощью успешно заменяют дефицитную медь алюминием в качестве токопроводящего материала. ХС обеспечивает безотходное изготовление обмоток электрических машин и трансформаторов, замена штамповки медных коллекторных пластин электрических двигателей на холодную сварку позволяет сократить отходы металла в 8...10 раз.

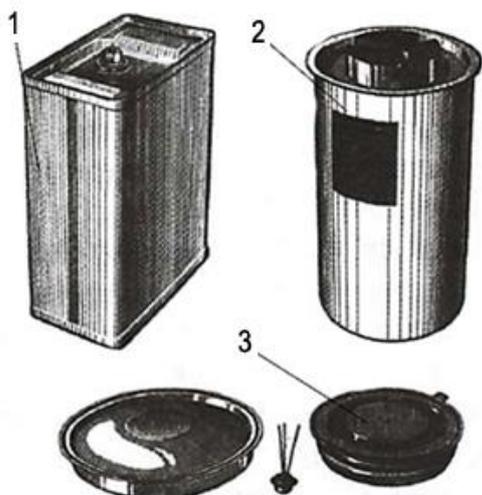


Рис. 2.13. Детали и узлы для ХС: 1 – корпус источника тока; 2 – корпус конденсатора с герметично приваренной крышкой; 3 – банка для гигроскопичного продукта, транзистор и тиристор



Рис. 2.14. Медный контактный провод после испытания на растяжение и изгиб

В **радиоэлектронике** холодную сварку применяют для герметизации корпусов полупроводниковых приборов, для стыков соединения электродов радиоламп, для пережима металлических штенгелей электровакуумных приборов после откачки; в **цветной металлургии** – для соединения алюминиевых или титановых катодных штанг с магистральными медными шинами; в **приборостроении** – для изготовления шасси приборов из алюминия и его сплавов; в **машиностроении** – при изготовлении переходных элементов из разнородных материалов, используемых в криогенной технике; на электрифицированном **железнодорожном и городском транспорте** – для соединения медных контактных (троллейбусных)

Сварочные процессы и оборудование

проводов. Также ХС используют при изготовлении посуды, бачков, молочных фляг и других *изделий из алюминия*.

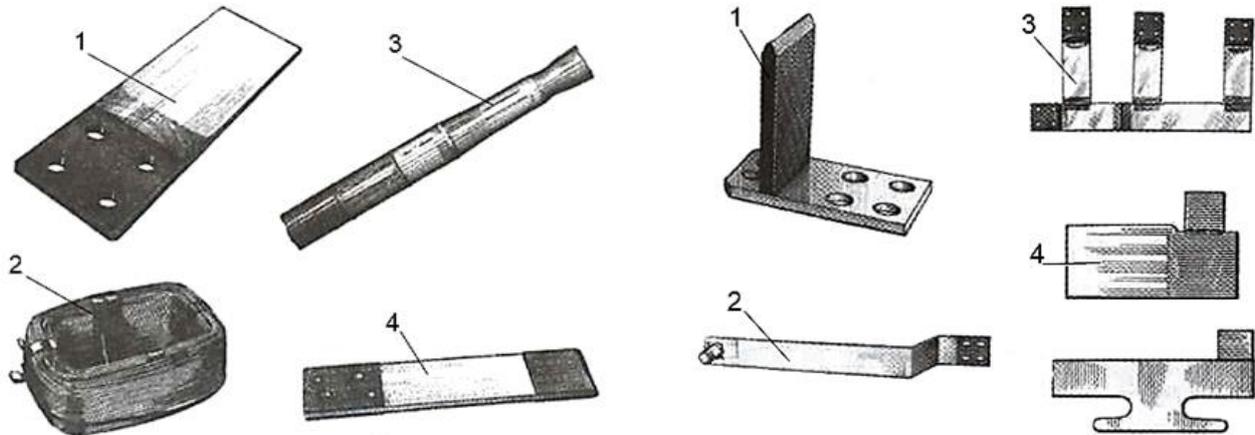


Рис. 2.15. Сваренные детали ХС: 1 – медно-алюминиевая шина; 2 – алюминиевая обмотка с приваренными встык медными выводами; 3 – медно-алюминиевый стержень; 4 – алюминиевая шина с приваренными медными накладками

Рис. 2.16. ХС электротехнических изделий: 1 – тавровое соединение алюминиевой и медной шин; 2 – контактный нож комплектно-распределительного устройства; 3 – алюминиевая шина с приваренными алюминиевым и медным отводами; 4 – коллекторные пластины электродвигателей. Сохраняется гладкой внутренняя поверхность алюминиевой посуды, что облегчает ее эмалирование



Рис. 2.17. ХС посуды: 1 – алюминиевая кастрюля с приваренными ручками; 2 – алюминиевый чайник с приваренными ушками и дном

Замена холодной сваркой механических соединений контактных проводов на электрифицированном транспорте дает следующие преимущества:

1. Повышается надежность соединений за счет улучшения качества контакта, уменьшаются искрение и местный износ провода.
2. Достигается экономия металла за счет отсутствия зажимов и клемм, а также полного использования короткомерных обрезков провода.
3. Уменьшаются радиопомехи и улучшаются условия прохождения электро-транспорта при высоких скоростях движения.

Холодная сварка – единственный надежный способ присоединения медных выводов к концам алюминиевых обмоток и шин, что обеспечивает стабильный электрический контакт в разъемных соединениях элементов электротехнических изделий. Это дает возможность заменять медь алюминием в качестве токопроводящего материала без снижения срока службы изделий.

ХС – уникальный способ получения тавровых и штыревых соединений алюминиевых деталей с медными. Она позволяет получить Т-образные и угловые соединения плоских шин и механизировать процесс сборки шинопроводов. Применение ХС сводит к минимуму отходы меди при изготовлении коллекторных пластин электрических двигателей.

Точечная холодная сварка – наиболее экономичный и производительный путь замены клепки в производстве изделий из алюминия.

Контрольные вопросы

1. Какие металлы соединяют с помощью холодной сварки?
2. Охарактеризуйте способы соединения деталей при холодной сварке.
3. Какой способ холодной сварки позволяет избежать вмятины?
4. Укажите требования к подготовке деталей для холодной сварки.

2.2.2 СВАРКА ВЗРЫВОМ

Сварка взрывом (СВз) является новым перспективным технологическим процессом соединения материалов в твердой фазе, получающим в последние годы все более широкое применение в отечественной и зарубежной практике благодаря существенным преимуществам в сравнении с традиционными методами. В создание и развитие этого способа соединения трудносвариваемых материалов и конструкций большой вклад внесли ученые Института гидродинамики РАН, Волгоградского и Пензенского гостехуниверситетов, ЦНИИчермет и других организаций. основополагающие исследования были проведены А.А. Дерibasом, В.С. Седых, Э.С. Отрощенко и их учениками [1].

При СВз образование соединения происходит в процессе соударения двух свариваемых деталей (пластин) под воздействием ударной волны. При этом ударная волна очищает поверхность и деформирует прилегающие к зоне соединения приповерхностные объемы материала. Схема сварки при параллельном расположении пластин показана на рисунке 2.18.

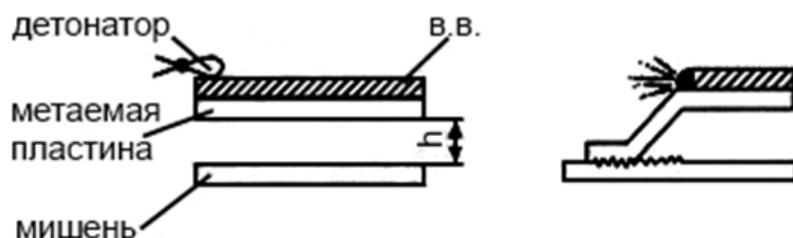


Рис. 2.18. Схема сварки взрывом с параллельным расположением пластин

Физические явления, сопутствующие сварке взрывом, зависят от величины основных параметров высокоскоростного соударения. К ним относятся:

1 – кинематические параметры: скорость метаемой пластины V_0 , угол соударения γ , скорость точки контакта V_k ;

2 – физические параметры: давление, длительность соударения, температура и т.п.

Для получения соединения при сварке взрывом необходимо выполнение двух условий:

- давление при соударении должно достичь определенной величины;
- скорость перемещения точки соударения должна быть меньше скорости звука.

Давление при соударении зависит от скорости движения пластины, а равновесная скорость движения пластины от соотношения c/m , где, c – масса заряда, m – ускоряемая масса.

Скорость перемещения точки соударения не должна превышать скорости звука в металле по следующим причинам. Когда две пластины первоначально параллельны, и детонация распространяется с одного конца, скорость перемещения точки соударения равна скорости детонации заряда V_0 . Скорость ударной волны V_H приближается к скорости звука в материале пластины (например, в алюминии – 5240 м/с, в меди – 3580 м/с). Если скорость детонации больше скорости звука, то отраженная звуковая волна может разрушить только что созданное сварное соединение. Поэтому подбирают такое взрывчатое вещество (ВВ) (аммониты, гранулиты, зерногранулиты), чтобы скорость детонации была от 2500 до 3600 м/с, тогда отраженная звуковая волна ударяется о свариваемую плоскость раньше, чем давление взрыва ударом соединит верхнюю пластину с нижней.

Большинство технологических схем сварки взрывом основано на использовании **направленного (кумулятивного) взрыва**. Кумулятивность осуществляется тем, что свариваемые детали располагаются под некоторым углом $\alpha = 2...16^\circ$ с начальным расстоянием друг от друга в вершине угла $h = 2...3$ мм (рис. 2.19).

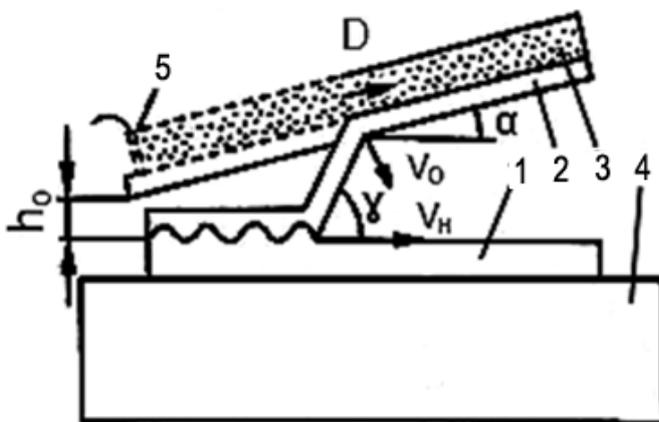


Рис. 2.19. Принципиальная схема сварки металлов взрывом: 1 – неподвижная пластина; 2 – метаемая пластина; 3 – заряд ВВ; 4 – основание; 5 – детонатор

Следует учесть, что **воздушная кумулятивная струя** во всех случаях движется с большей скоростью, чем звуковая и детонационная. Эта струя, направленная из острия угла α в сторону его раствора, обладает давлением порядка 10^{11}

Па (от нескольких сот до миллиона атмосфер). Благодаря такому огромному давлению и весьма большой скорости (6000...7000 м/с) высокотемпературная кумулятивная струя производит прежде всего идеальную очистку поверхности пластин от любого вида загрязнений.

Несмотря на большое давление воздушной кумулятивной струи и последующий за ней сильнейший удар детонационной волны взрыва, зона пластических деформаций в сварном контакте относительно невелика. Она лишь немного превышает толщину фронта ударной волны, составляющей приблизительно 30...300 параметров кристаллической решетки. Исходная толщина свариваемых деталей почти не изменяется и после сварки. Весь процесс сваривания протекает за миллионные доли секунды.

В микромасштабе кристаллитов металл нагревается не только до плавления, но и почти до температуры кипения ~ 2500 К. Поэтому взрывосварные соединения характеризуются наличием не травящихся белых прослоек по плоскости контакта, объяснить которые обезуглероживанием невозможно хотя бы потому, что они получаются не только на сталях. Такого же рода белые прослойки получаются и в результате искрового удара.

В результате этих процессов происходит значительное упрочнение металла. Например, известно, что взрывным ударом твердость отожженной малоуглеродистой стали можно увеличить в 4 раза, а предел текучести – в 6 раз. Качество взрывно-сварных соединений будет высоким, если правильно подобрать режимы сварки (сорт ВВ, его толщина, взаимное расположение деталей) для каждого сочетания металлов. Сварные соединения выдерживают в дальнейшем любую механическую и термическую обработку. Особенности процесса сварки взрывом.

1. Сварное соединение образуется в течение миллионных долей секунды, т.е. практически мгновенно. Оно возникает вследствие образования металлических связей при совместном пластическом деформировании свариваемых поверхностей металла. Малая продолжительность сварки предотвращает возникновение диффузионных процессов. Это позволяет сваривать металлы, которые при обычных процессах сварки с расплавлением образуют в шве хрупкие интерметаллические вещества, делающие швы непригодными к эксплуатации.

2. При СВз можно получать соединения неограниченной площади. При этом процесс сварки осуществляется тем легче, чем больше отношение площади соединения к толщине метаемой части металла. Можно осуществлять сварку соединений площадью 15-20 м².

Имеются сведения о плакировании листов площадью до 50 м², толщиной до 460 мм и массой до 40 т. Толщины плакирующих слоев могут быть от 0,01 до 45 мм.

На рисунке 2.20 представлены технологические схемы СВз.

Сварочные процессы и оборудование

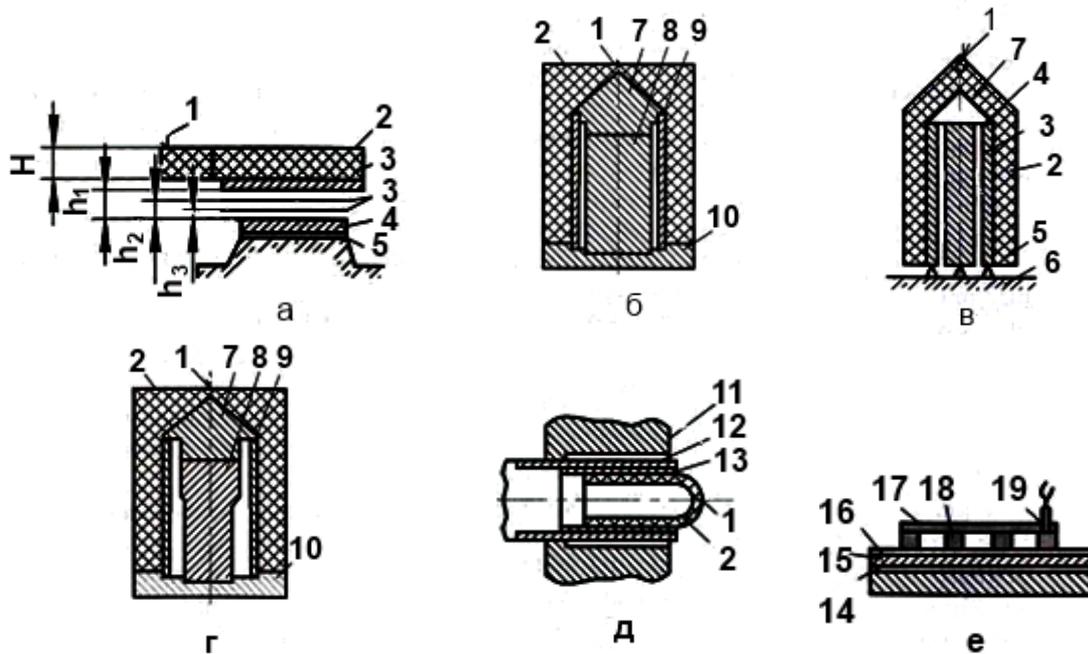


Рис. 2.20. Технологические схемы сварки взрывом соединений различного типа: 1 – детонатор; 2 – заряд ВВ; 3 – метаемые пластины; 4 – неподвижная пластина; 5 – подложка; 6 – грунт; 7 – металлическая призма или конус для центрирования заготовок и направления фронта детонационной волны; 8 – облицовываемый цилиндр; 9 – метаемая труба; 10 – центрирующая шайба; 11 – трубная решетка; 12 – трубка; 13 – буферная пластмассовая цилиндрическая вставка; 14, 15 – свариваемые листы; 16 – опора; 17 – буферная прокладка; 18 – взрывчатое вещество; 19 – электродетонатор; а – сварка трех- и многослойных плоских соединений одновременно одним зарядом ВВ; б – приварка двух наружных слоев к листу взрывом из одной точки двух зарядов ВВ; в – наружная облицовка цилиндрических тел кольцевым зарядом ВВ; г – сварка биметаллических цилиндрических заготовок переменного диаметра для изготовления из разнородных металлов бесступенчатых трубных переходников; д – приварка труб к трубным решеткам теплообменника; е – точечная СВз предусматривает сборку тонких листов (14, 15) без зазора по опоре (16)

На верхний лист устанавливается через буферную прокладку (17) цилиндрический заряд взрывчатого вещества (18), взрываемый электродетонатором (19). После взрыва происходит соединение в виде кольца, внутренний диаметр которого несколько меньше наружного диаметра заряда. Для повышения эффективности сварки заряд помещается в пластиковый патрон, торец которого имеет выпуклую форму. Это позволяет концентрировать усилия взрыва.

Возможна установка и взрыв нескольких патронов, т.е. получение за один взрыв многоточечного соединения. Для точечной СВз в основном используют высокоскоростные ВВ (гексоген, тринитротолуол, тетрил и др.).

Сварка взрывом используется в таких областях техники, как ракетная, автомобильная, авиационная, судостроение, аппаратостроение, металлургия и многих других. Этим способом соединяют самые различные (компактные и порошковые) металлы и сплавы, получают сложные двухслойные и многослойные композиционные материалы, биметаллические заготовки и изделия практически неограниченных размеров из разнообразных металлов и сплавов, в том числе и из тех, сварка которых другими способами затруднена.

При инициировании по заряду ВВ распространяется фронт детонации со скоростью D до нескольких тысяч метров в секунду. Под действием высокого давления расширяющихся продуктов взрыва метаемая пластина приобретает скорость VQ порядка нескольких сотен метров в секунду и соударяется с неподвижной пластиной под определенным углом. Вследствие высокой скорости приложения давления в зоне контакта происходит очистка поверхностей, их активация и образование соединения. Соединение обычно имеет характерную волнообразную форму (рис. 2.21, *а*), однако, встречаются соединения и без волнообразования (рис. 2.21, *б*).

Так же, как и при других методах сварки давлением, технологические и физико-химические аспекты получения качественных соединений чистых металлов и сплавов зависят, прежде всего, от их взаимной растворимости.

СВз однородных металлов применяют сравнительно редко. Хотя сварка их не вызывает значительных затруднений.

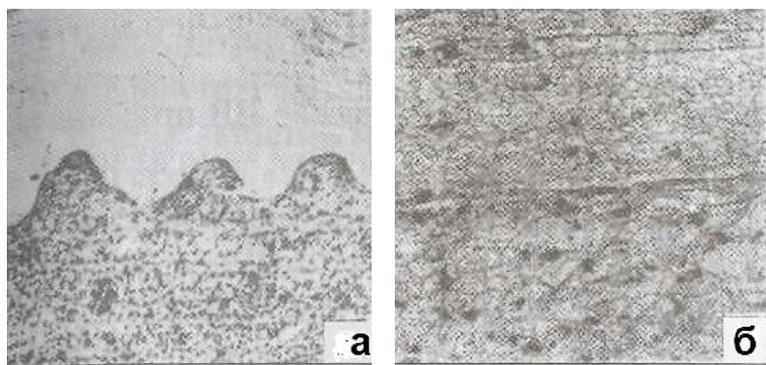


Рис. 2.21. Форма соединения, полученного сваркой взрывом: *а* – соединение волнообразной формы; *б* – соединение без волнообразования

Большое практическое значение имеет сварка металлов, образующих твердые растворы. Наиболее типичным примером этой группы, успешно соединяемых СВз, является биметалл сталь-никель и его сплавы.

Сварка металлов ограниченно растворимых или нерастворимых в твердом состоянии имеет некоторые особенности, например, СВз сталей с медью и ее сплавами.

Наиболее перспективная область применения СВз – соединение металлов, образующих при взаимодействии новые химические соединения – интерметаллиды. Однако получение биметаллов сталь – алюминий, сталь – цирконий может осуществляться в довольно узком диапазоне параметров соударения.

Основные требования к ВВ для сварки взрывом. Скорость детонации должна быть меньше скорости звука в соединяемых металлах и находиться в диапазоне от 1500 м/с до скорости звука.

В плоских зарядах ВВ большой площади и малой толщины должна быть обеспечена необходимая стабильность детонации. ВВ должны быть максимально безопасными в обращении, недорогими и сохранять стабильность свойств в течение времени, установленного для промышленных ВВ. Этим требованиям, отвечают смеси тринитротолуола (ТНТ) и аммиачной селитры (NH_4NO_3). На практике при сварке взрывом широко применяют плоские заряды смесей аммонита 6ЖВ с гранулированной аммиачной селитрой (АТ-1, АТ-2, АТ-3), а также трехкомпо-

нентные смеси ТНТ – NH_4NO_3 – NaCl (А-40, А-50). Скорость детонации этих зарядов зависит от их толщины, состава, степени измельчения компонентов и влажности.

В отечественной и зарубежной практике в качестве ВВ применяют также смеси аммиачной селитры с дизельным топливом – игданиты. Основными технологическими параметрами СВз являются:

- скорость детонации D , характеризующая заряд ВВ;
- безразмерный параметр r – отношение массы ($m_{\text{ВВ}}$) заряда ВВ к массе метаемой пластины ($m_{\text{пл}}$); при равенстве площадей заряда и пластины

$$r = m_{\text{ВВ}} / m_{\text{пл}} = \delta_0 \rho_0 / \delta_1 \rho_1$$

где δ_0, ρ_0 – высота и плотность заряда; δ_1, ρ_1 – толщина и плотность метаемой пластины;

- сварочный зазор h – первоначальное расстояние между пластинами;
- микрорельеф свариваемых поверхностей, характеризуемый их шероховатость R_z ;
- температура свариваемых поверхностей t_1, t_2 , физико-механические характеристики свариваемых материалов (прочность, твердость, вязкость и др.).

Из-за специфических особенностей процесса теоретический расчет всех параметров весьма затруднителен. Зная технологические параметры сварки: начальный зазор h , толщину слоя ВВ H , скорость детонации заряда D , его плотность $\rho_{\text{ВВ}}$, толщину $\delta_{\text{в}}$ и плотность ρ_1 металла метаемой пластины, можно рассчитать величины скорости соударения V и давление соударения P .

В практике для определения режимов сварки однородных или близких по физико-химическим свойствам металлов обычно достаточно ориентировочно выбрать V и P и сварить серию образцов с применением ВВ, скорость детонации которого составляет 3000...4000 м/с. При этом от образца к образцу уменьшают или увеличивают скорость V , изменяя зазоры h между соударяющимися поверхностями. По результатам механических испытаний находят оптимальную скорость V .

Для определения режимов сварки разнородных металлов с большим различием физико-механических свойств, например, титана со сталью, проводят несколько серий опытов, варьируя величину V_k , что дает возможность определить максимальное значение $\sigma_{\text{в}}$.

Сварочный зазор обычно применяется равным одной-двум толщинам метаемой пластины. Иногда применяют зазор порядка $0,1 \dots 0,2 \delta_0$, где δ_0 – толщина заряда.

Величина R_z применяется обычно равной 2...5 мкм. Металлографическими исследованиями полученных соединений установлено, что в интервале шероховатости $R_z = 20 \dots 80$ мкм параметры волн имеют значительный разброс по величине.

С уменьшением высоты микронеровностей, свариваемых поверхностей волны, становятся регулярными, существенно уменьшается их разброс по величине, а форма приближается к синусоидальной.

Уменьшение шероховатости поверхностей благоприятно сказывается на свойствах соединения: прочность соединения слоев растет с одновременным снижением количества литых включений.

Наибольшее влияние на величину заряда, а, следовательно, и на угол соударения и скорость метания, оказывает модуль нормальной упругости E . Модуль упругости связан со скоростью звука (c) зависимостью $E = c^2\rho$ и определяет способность материала к релаксации напряжений.

При отношении модулей упругости свариваемых материалов 0,6...2,2, их сварка взрывом происходит в одном диапазоне режимов соударения. Для материалов с резко различающимися модулями упругости, например, сталь-алюминий и сталь-алюминиевые сплавы, необходимо значительное увеличение параметров соударения.

При СВз небольших изделий, как правило, проводится качественная подготовка поверхностей (удаление окалины, гидроксидных пленок, масла, влаги и др.). Однако при переходе к плакированию крупногабаритных изделий, особенно в полевых условиях, очистка затрудняется. На свариваемых поверхностях могут оставаться следы масла, ржавчины, влаги и пыль. Потому поверхности перед сваркой зачищают. Зачищенные поверхности обычно перед отправкой на полигон консервируют, а затем перед сваркой очищают. Неполное удаление консервационных составов также может служить причиной ухудшения качества соединения.

Особое внимание для получения качественных соединений при СВз имеет процесс их самоочистения. Оксидные пленки, не удаленные при предварительной очистке или появившиеся в процессе сварки, могут препятствовать формированию соединения. При сварке взрывом в условиях косых соударений самоочистение происходит в первую очередь в результате образования кумулятивной (обратной) струи.

Давление при соударении зависит от скорости движения пластины, а равновесная скорость движения пластины – от соотношения m_3/m , где m_3 – масса заряда, m – ускоряемая масса.

Так как ускорение движения пластины до конечной скорости занимает определенное время, между метаемой пластиной и мишенью должно быть достаточное расстояние (зазор). Давление на поверхности раздела при соударении должно быть в 10 раз больше предела текучести материала, а соотношение c/m должно быть достаточным для обеспечения этого давления. Обобщающим параметром сварки взрывом является величина пластической деформации материала в зоне соединения.

Необходимо учитывать, что воздушная кумулятивная струя во всех случаях движется с большей скоростью, чем звуковая и детонационная. Эта струя, направленная из острия угла β в сторону его раствора, обладает давлением порядка


a

б

в

Рис. 2.22. Типы соединений при сварке взрывом: *a* – синусоидальный; *б* – волнообразный с вихревыми; *в* – с непрерывным слоем расплава

ка 10^{11} Па (от нескольких сот до миллиона атмосфер). Благодаря такому огромному давлению и весьма большой скорости (6000...7000 м/с) высокотемпературная кумулятивная струя производит идеальную очистку поверхности пластин от любого вида загрязнений. Однако эта же струя создает и весьма характерный волновой профиль на поверхности металла с высотой и длиной волн порядка десятых долей миллиметра (рис. 2.22, *a*).

В оптимальных режимах соударения расплавы не образуются. При избыточной энергии соударения наблюдаются отдельные участки с расплавами (рис. 2.22, *б*, *в*). Несмотря на большое давление воздушной кумулятивной струи и последующий за ней сильнейший удар детонационной волны взрыва, зона пластических деформаций в сварном контакте относительно невелика, она лишь немного превышает толщину фронта ударной волны, составляющей приблизительно 30...300 параметров кристаллической решетки. Исходная толщина свариваемых деталей почти не изменяется и после сварки. Весь процесс сваривания протекает за миллионные доли секунды, поэтому диффузия практически не успевает происходить.

В микромасштабе кристаллитов металл нагревается не только до плавления, но и почти до температуры кипения ~ 2500 К. Поэтому взрывно-сварные соединения характеризуются

наличием нетравящихся белых про слоев по плоскости контакта, объяснить которые обезуглероживанием невозможно хотя бы потому, что они получаются не только на сталях. Такого же рода белые прослойки получаются и в результате искрового удара.

Взрывно-сварные соединения своеобразны и по субмикроструктуре. Волнообразная поверхность пересыщена закрепленными дислокациями. Более глубокий микроскопический слой, наоборот, может быть значительно приближен к идеальной решетке, поскольку он был подвержен высокому всестороннему давлению, благодаря которому большинство микродефектов залечивается. В результате этих процессов происходит значительное упрочнение металла. Например, известно, что взрывным ударом твердость отожженной малоуглеродистой стали

можно увеличить в 4 раза и предел текучести – в 6 раз. Качество взрывно-сварных соединений будет высоким, если правильно подобрать режимы сварки (сорт ВВ, его толщина, взаимное расположение деталей) для каждого сочетания металлов. Сварные соединения выдерживают в дальнейшем любую механическую и термическую обработку.

Возможно получение биметалла сталь-титан сваркой взрывом без переходных диффузионных зон и дефектов с прочностью соединения 350...500 МПа.

Имеющиеся данные по влиянию на диффузионную подвижность атомов скоростей деформации порядка 10^5 с^{-1} в условиях СВз свидетельствуют о достаточно малой глубине зоны диффузионного взаимодействия порядка 25 мкм. Кратковременность процесса сварки (микросекунды) недостаточна для развития диффузионных процессов и предупреждает образование хрупких фаз между разнородными металлами.

В России работают промышленные полигоны по производству биметалла СВз на Орско-Халиловском (ОХМК) и Кузнецком (КМК) металлургических комбинатах. На сварке взрывом специализирован также Гилевский опытно-экспериментальный завод НПО «АНИТИМ».

Особенностью работы полигона ОХМК является то, что вся подготовка заготовок к взрыву (зачистка, мойка, сборка в пакет) производится в цехе на комбинате, собранные пакеты железнодорожным транспортом месту взрыва. После сварки взрывом по той же цепочке заготовки доставляются в цех, где проходят контроль и при необходимости – термическую обработку. Основная продукция ОХМК – выпуск по технологии НПО «АНИТИМ» трехслойных заготовок под последующий прокат.

Определенные преимущества есть у подземных участков (полигонов), так как работа на них не зависит от времени года и погодных условий, обеспечивая локализацию поражающих факторов. Один из таких участков, расположенный в подземных каменоломнях в штате Пенсильвания, имеет фирма «Дюпон» (США).

Лист основания в сборе с плакирующим листом, на котором уложен заряд ВВ, подается в камеру-тоннель специальным транспортом в виде массивной платформы по железнодорожным путям, снабженным надежными устройствами для амортизации удара в момент взрыва. После взрыва и продувки камеры для удаления газообразных продуктов детонации платформа с плакированным изделием выкатывается из тоннеля.

Подземный участок сварки металлов взрывом в России имеет Зыряновский свинцовый комбинат.

Металлические взрывные камеры нашли применение, как в нашей стране, так и за рубежом.

В НПО «АНИТИМ» были разработаны и изготовлены тонкостенные камеры 5...10 мм, предназначенные для лабораторных работ и рассчитанные на заряд 0,25...5 кг ВВ, которые оснащены системой вакуумирования и вентиляции. Одна из таких камер (рис. 2.23) представляет собой цилиндрическую вертикально расположенную конструкцию (1) диаметром 3,0 м с эллиптическими днищами.

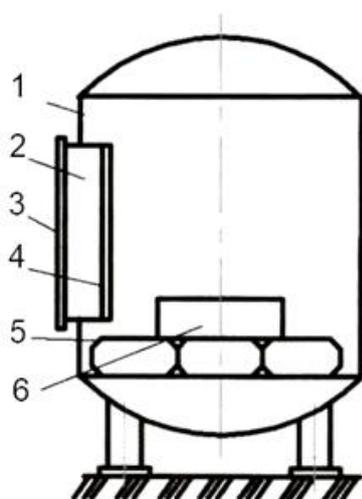


Рис. 2.23. Цилиндрическая взрывная камера

Оболочка выполнена из стали 22К с толщиной стенок цилиндрической части 10 мм и дна 16 мм. Корпус камеры рассчитан на рабочее давление 0,6 МПа и отрицательное 0,16 Мпа.

Загрузочный люк (2) прямоугольной формы размером 2,0×0,8 м позволяет свободно размещать в камере изделия значительных размеров и не создает трудностей при обслуживании. К тамбуру загрузочного люка на шарнирах подвешена наружная (герметизирующая) дверь (3). Для защиты тамбура от воздействия ударной волны имеется внутренняя дверь (4).

В нижней части камеры на амортизаторах (5) установлена опора с наполнителем из металлической дроби (6), на которой производятся технологические операции взрывной обработки. Камера оборудована защитными устройствами для

гашения ударной волны и установлена в здании.

Двадцатилетний опыт эксплуатации данной установки подтвердил ее высокую надежность, простоту, техническую и экономическую целесообразность.

В ФРГ создана крупная камера для сварки взрывом объемом 600 м³. Камера оснащена столом размерами 6×3 м (рис. 2.24). Работа в данном случае не зависит от погодных условий, так как камера расположена в заводском корпусе. В камере производятся плакирование, вварка труб в решетку и ремонт теплообменников из специальных материалов.

В ИЭС им. Е.О. Патона создана трубчатая камера принципиально новой конструкции (рис. 2.25). Ее полусферический (цилиндрический) корпус образован отрезками радиально расположенных стандартных тонкостенных труб (5), которые соприкасаются внутренними торцами, образуя поверхность внутреннего рабочего пространства камеры. Внешние концы труб заглушены, а пространство между открытыми внутренними торцами труб герметично закрыто фигурными элементами. Оси труб ориентированы радиально вдоль направления преимущественного разлета продуктов детонации взрывчатых веществ.

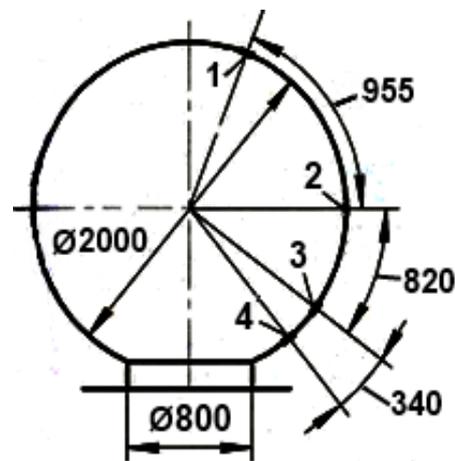


Рис. 2.24. Схема размещения тензорезисторов на сферической оболочке, установленной на опорной конструкции: 1-4 – точки измерений

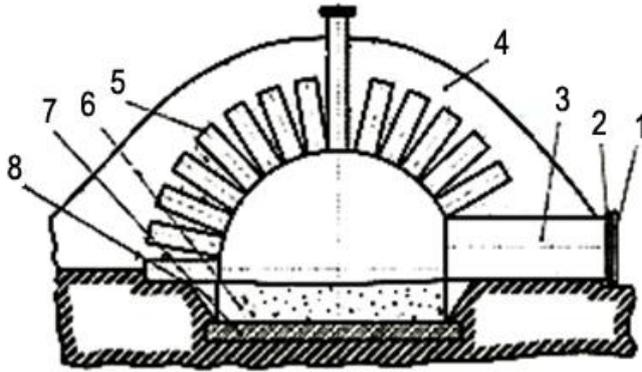


Рис. 2.25. Схема трубчатой взрывной камеры с зарядом 200 кг

Трубчатый корпус камеры, снабженный загрузочным проемом (2) с крышкой (1) и вентиляционным каналом (4), связан с контейнером для опоры (6) – металлическим коробом (8) цилиндрической формы, заполненным песком или другой подходящей средой. Под коробом имеется железобетонный фундамент (7). Для уменьшения звукового эффекта, повышения несущей способности камеры и демпфирования колебаний корпуса

последний снаружи покрыт слоем (3) смеси песка и грунта.

В настоящее время накоплен определенный опыт эксплуатации лабораторных и опытно-промышленных взрывных камер небольшой мощности, в качестве корпусов которых используются цилиндрические и сферические оболочечные конструкции.

В отечественном машиностроении накоплен значительный опыт непосредственного плакирования взрывом с исследованием служебных свойств получаемых биметаллических заготовок и деталей. В частности, освоено плакирование больших листов толщиной 70...100 мм, площадь 10-20 м² для толстостенных сосудов давления ответственного назначения со сплошностью соединения приблизительно 100 % при отличном качестве поверхности плакирующего слоя и незначительных сварочных деформациях. Горячая гибка и штамповка таких листов не вызвала повреждений плакирующего слоя и его соединения с листом основания.

Биметалл технологичен, не требует изменения принятой на заводе технологии изготовления сосудов высокого давления.

Плакирование взрывом очень эффективно при изготовлении трубных досок теплообменных аппаратов. С его помощью можно выполнить корпус сосуда, включая несущий слой трубной доски, из недорогой конструкционной стали, а трубную часть из высоколегированной стали или сплава с приваркой труб герметичными швами к плакирующему слою трубной доски, выполненному из материала труб. В зависимости от диаметра и толщины трубная доска может быть изготовлена из листов или кованных заготовок, плакированных взрывом высоколегированной сталью. По первому варианту на Уральском турбомоторном заводе были изготовлены трубные доски толщиной 120 мм для сетевых подогревателей теплофикационных турбин мощностью 250 МВт; по второму на Уральском заводе химического машиностроения – кованные доски из низколегированной стали повышенной прочности массой более 40 т, диаметром 3,9 м, толщиной 0,460 м, плакированные аустенитной сталью ($\alpha_0 = 6$ мм).

Технология плакирования взрывом деталей со сложной криволинейной поверхностью была разработана и успешно внедрена на Ленинградском металлическом заводе при изготовлении колес радиально-осевых турбин Красноярской

ГЭС. Лопасты этих колес, отлитые из низколегированной стали, плакировали листами из стали 08X18H10T ($\alpha_0 = 3$ мм) на участках площадью около $5,5 \text{ м}^2$, подверженных наиболее интенсивной кавитации. Плакирование на специальной опоре резко снизило сварочные деформации лопасти; они оказались в несколько раз меньше, чем при наплавке ленточным электродом под флюсом по ранее принятой технологии, что позволило практически исключить правку лопастей. Получение гладкой и чистой поверхности плакирующего слоя исключило необходимость трудоемкого шлифования, что позволило сохранить повсеместно его номинальную толщину и обеспечило высокие эксплуатационные показатели лопасти. Стойкость против кавитации лопастей, плакированных взрывом, выше, чем наплавленных. Соответственно увеличился межремонтный период работы колес. Плакирование лопастей взрывом вместо их наплавки существенно снизило и их себестоимость. Плакировано взрывом и успешно эксплуатируется свыше 150 литых и профилированных лопастей рабочих колес на крупнейших гидроэлектростанциях. Опыт эксплуатации показал, что применение кавитационно стойких сталей с высоким содержанием марганца повышает срок службы рабочего колеса гидротурбины в 2...3 раза по сравнению с лопастями из стали 08X12НД.

По разработанной АНИТИМ совместно с ЦНИИТМАШ технологии плакирована изнутри цилиндрическая обечайка диаметром 4,0 м. При этом получена сплошность соединения практически 100 %, остаточные деформации не превышали допуска на размер при обработке.

Приведенные примеры подтверждают высокие технико-экономические показатели и надежность сварных соединений, полученных СВз, и перспективность их дальнейшего внедрения в народное хозяйство.

При СВз применяют заряды ВВ массой от нескольких граммов до сотен килограммов. Поэтому необходимо предусмотреть все необходимые меры для защиты людей и окружающей среды от поражающих факторов при взрыве ВВ.

Контрольные вопросы

1. Опишите процесс образования сварного соединения при сварке взрывом.
2. В каких областях применяют сварку взрывом?
3. От чего зависит скорость соударения?
4. Какие применяются камеры для сварки взрывом?

2.2.3 МАГНИТОИМПУЛЬСНАЯ СВАРКА

Магнитноимпульсная сварка (МИС) – сварка с применением давления, при которой соединение осуществляется в результате соударения свариваемых частей, вызванного воздействием импульсного магнитного поля.

Существует две основных разновидности этого процесса: магнитноимпульсная сварка на воздухе и вакуумно-термическая магнитноимпульсная обработка.

Все эти процессы основаны на явлении, открытом в 20-х годах XX в. академиком П.Л. Капицей – мощные импульсные и магнитные поля способны создавать огромные механические усилия, деформирующие металлы. П.Л. Капица получил поля напряженностью $2 \times 10^6 \dots 4 \times 10^7$ А/м в катушках, которые приводили к деформации токоподводящих шин и самих индукторов до разрушения. Витки индукторов увеличивались в диаметре, раскручивались и разрушались. Тогда эти явления считались негативными, но впоследствии они навели на мысль о возможности использования их для деформации металла.

Сущность МИС состоит в том, что разъединенные детали приводят в быстрое движение и соударяют со скоростью нескольких сотен м/с. Сварка происходит вследствие мощного разряда емкостного накопителя-конденсаторной батареи – на рабочий инструмент индуктор, внутри которого находятся свариваемые трубки. Разрядный ток, протекающий по индуктору, индуцирует в свариваемых деталях вихревые токи. Взаимодействие тока индуктора и тока в свариваемых деталях вызывает появление больших механических сил, приводящих к соударению металлических трубок (аналогично сварке взрывом), [1].

Основным условием МИС является высокая электропроводность соединяемых деталей, так как магнитное поле индуктора интенсивно действует на деформируемую деталь (трубку). Материалы малопроводящие ток обрабатывают, используя покрытия с высокой электропроводностью.

Принципиальная схема установки для соединения труб показана на рис. 2.26.

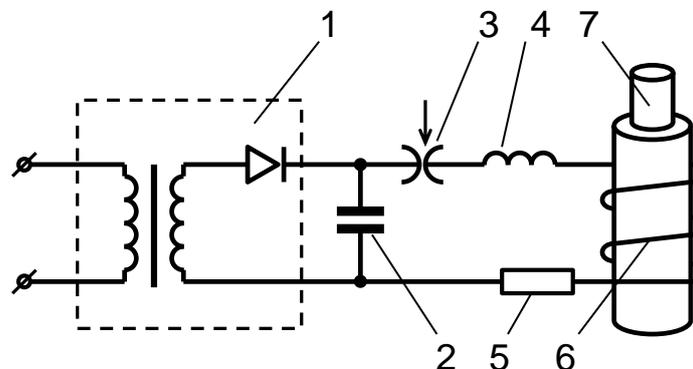


Рис. 2.26. Принципиальная схема установки МИС труб: 1 – устройство зарядное; 2 – батарея конденсаторов; 3 – коммутирующее устройство (разрядник); 4, 5 – собственная индуктивность и сопротивление разрядного контура; 6 – индуктор; 7 – соединяемые трубы

Схема процесса МИС труб из однородных металлов показана на рис. 2.27 и рис. 2.28.

На соединяемые трубы надевается сварочный индуктор 1, основной частью которого является (2), выполняемый в виде усеченного конуса при пропускании электрического тока по обмотке индуктора в ней и в той части труб, которые расположены внутри обмотки. Создается магнитное поле. Если изменить величину тока, то, соответственно, изменится и магнитное поле, которое наводит ЭДС

(электродвижущую силу) в металле труб. ЭДС создает вихревые токи, параллельные виткам индуктора.

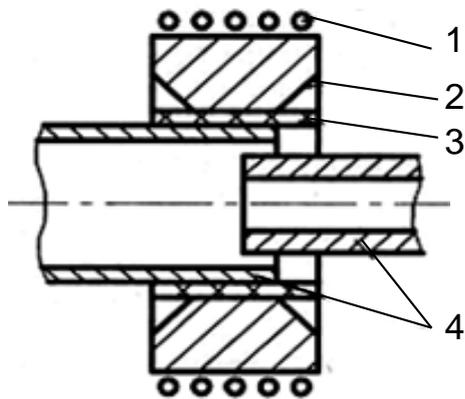


Рис. 2. 27. Расположение свариваемых элементов внутри индуктора: 1 – индуктор; 2 – последний виток индуктора; 3 – диэлектрик; 4 – соединяемые трубки

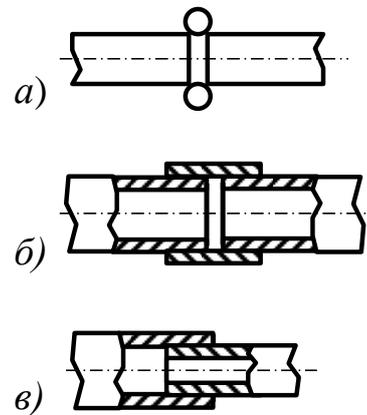


Рис. 2.28. Способы сварки труб из одноимённых металлов: а – встык с закладным деформируемым кольцом; б – телескопические соединения с деформируемой муфтой; в – с деформируемой внешней трубой

Взаимодействие двух магнитных полей создает электромагнитную силу, воздействующую на металл труб в зоне магнитного поля. Ток индуктора сдвинут относительно вихревого тока в свариваемых деталях по фазе на 180° , т.е. токи противоположны по направлению. Возникающие радиальные силы, нормальные к оси трубы, будут увеличивать диаметр индуктора и сжимать свариваемые трубы, уменьшая диаметр внешней трубы и деформируя ее металл.

На рис. 2.29 показана конструктивная схема сборки труб в индукторе для получения телескопических соединений.

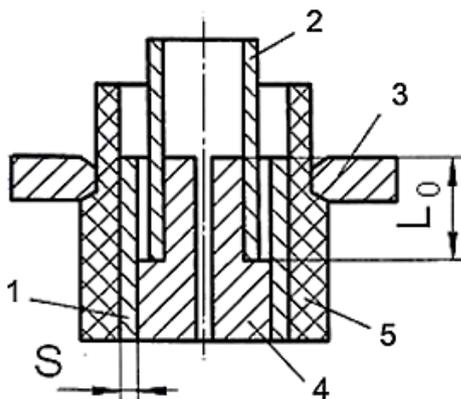


Рис. 2.29 . Конструктивная схема сборки для МИС телескопических соединений: 1 – металлическая часть заготовки; 2 – неподвижная деталь; 3 – индуктор-концентратор; 4 – центрируемая металлическая оправка; 5 – фторопластовая втулка; L_0 – длина металлической детали – зона сварки

МИС может быть совмещена с процессом формообразования и прессования, проводиться на воздухе или в вакууме.

Индуктор во время работы испытывает значительные механические, тепловые и электрические нагрузки, что может привести к выходу его из строя. Наиболее сильным нагрузкам подвергается последний виток индуктора-концентратора.

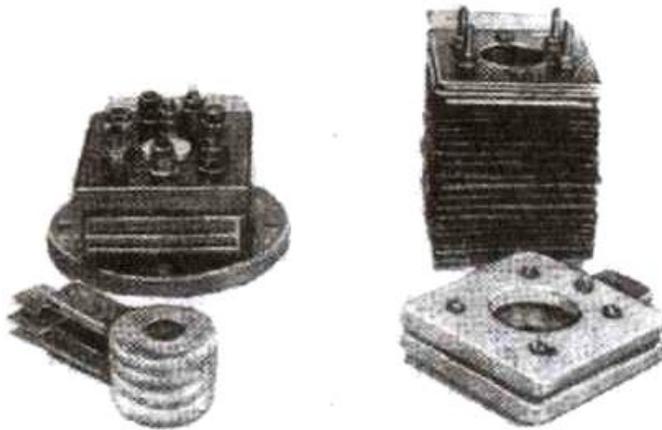


Рис. 2.30. Фотографии монолитных (или составных) индукторов

Поэтому его изготавливают, как правило, достаточно монолитным или составным. На рис. 2.30 показано фото таких индукторов.

Современные конструкции индукторов имеют водяное охлаждение, надежную изоляцию и способны выдерживать по 50...100 тыс. сварок. При ручной загрузке и управлении производительность составляет до 350...400 изделий/ч.

Для сварки разнородных материалов можно предварительно нагревать одну из свариваемых деталей.

В частности, для получения телескопического соединения стальной и алюминиевой труб конец одной из труб делают коническим, а стальную трубу предварительно нагревают.

Институтом электросварки им. Е.О. Патона разработан способ МИС разнородных труб различных диаметров и толщин стенок, сваривают трубы-переходники из нержавеющей стали и алюминия, меди и алюминия. Прочность сварных соединений на разрыв близка прочности цельной алюминиевой трубы. Испытание образцов на вакуумную плотность гелиевым течеискателем и на плотность при давлении 13 атмосфер после нагрева их до 500 °С дало положительные результаты. Сварка в лабораторных условиях доказала возможность применения данного способа в промышленности.

В ряде последующих работ проведены исследования магнитоимпульсной

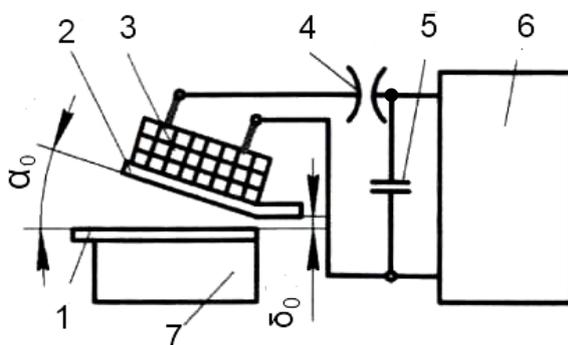


Рис. 2.31. Принципиальная схема МИС, разработанная в СГАУ

сварки с предварительным расположением свариваемых поверхностей деталей под углом друг к другу и с зазором между ними.

В Куйбышевском авиационном институте им. академика С.П. Королева (ныне СГАУ) была впервые осуществлена магнитоимпульсная сварка по схеме, представленной на рис. 2.31. Согласно разработанному способу, детали (1) и (2) устанавливают внахлестку под острым углом (α_0) друг к другу и с зазором (δ_0) между ними.

Индуктор (3) устанавливают на поверхности, противоположной свариваемой. Для

предотвращения перемещения при сварке деталь (1) жестко закрепляется в опоре (7). Закрепление детали (2) должно обеспечить перемещение ее свариваемого конца в направлении детали (1). Индуктор (3) присоединяется своими выводами к генератору импульсов тока, который состоит из зарядного устройства (6), батареи конденсаторов (5) и коммутирующего устройства (4).

После зарядки батареи конденсаторов от зарядного устройства до заданного напряжения включается коммутирующее устройство, замыкающее батарею конденсаторов на индуктор. При разряде батареи конденсаторов в зазоре между индуктором и заготовкой возникает сильное магнитное поле, индуцирующее в этой заготовке ток. Взаимодействие тока индуктора с индуцированным током в заготовке приводит к возникновению сил отталкивания между индуктором и деталью (2), вследствие чего деталь (2) мгновенно с большой скоростью перемещается от индуктора в направлении неподвижной детали (7); при соударении в зоне контакта развиваются высокие давления, и образуется сварное соединение. На рис. 2.32 показано несколько примеров осуществления сварки по этой схеме.

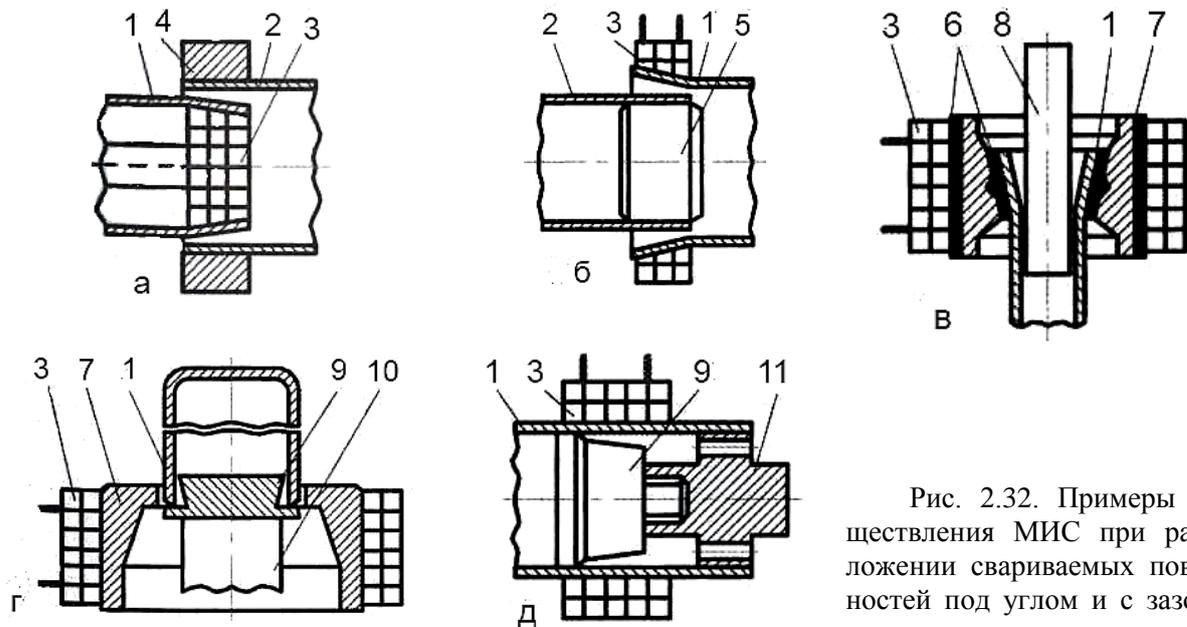


Рис. 2.32. Примеры осуществления МИС при расположении свариваемых поверхностей под углом и с зазором между ними

МИС можно получать нахлестанные соединения равно- и разнотолщинных тонкостенных труб.

При сварке индуктор устанавливают внутри или снаружи трубчатой детали. По первому варианту (рис. 2.32, а) труба (1) с отформованным усеченным на конус концом вставляется в другую трубу (2) или отверстие детали с зазором между свариваемыми поверхностями.

Перед сваркой соединяемые поверхности обезжиривают и зачищают. Снаружи на трубу (2) для предотвращения ее деформации при сварке надевается металлическая обойма (4). При достаточной жесткости детали (2) сварку осуществляют без обоймы. Внутри трубы (1) в зону усеченного конуса вставляют индуктор (3), подсоединенный к магнитоимпульсной установке. По первому варианту можно сваривать тонкостенные трубы, разнотолщинные трубы, когда тонкостенная

труба расположена внутри, а также тонкостенные трубы с охватывающими конструктивными деталями (фланцами и др.).

По второму варианту (рис. 2.32, б) трубу (1) с конусной отбортовкой на конце надевают на другую трубу (2) или цилиндрический стержень с зазором между предварительно обезжиренными и зачищенными свариваемыми поверхностями. Для предотвращения смятия трубы (2) в процессе сварки внутрь ее без зазора вставляют металлическую оправку (5), удаляемую после сварки. В случае если неподвижная труба достаточно жесткая, чтобы выдержать давление при сварке без остаточных деформаций, необходимость в оправке отпадает. Снаружи на трубу (1) на участке конусной отбортовки устанавливают индуктор (3).

По второму варианту сварки возможно получение соединений тонкостенных труб, разнотолщинных труб с тонкостенной трубой снаружи, тонкостенных труб со сплошными цилиндрическими деталями (тяги и др.).

Для локализации электромагнитного давления в зоне сварки можно применить концентратор электромагнитного поля (7) – металлический вкладыш с продольной щелью-разрезом, изолированный с обеих сторон прокладками (6). Наиболее эффективно применение концентратора при установке его снаружи на трубу, свариваемую со стержнем (8) (рис. 2.32, в), чем достигается значительное уменьшение длины нахлёста соединяемых деталей.

Типичным примером использования МИС является приварка к стаканам заглушек (9), устанавливаемых на упоры (10) (рис. 1.27, з) и к трубам (рис. 2.32, д). Во втором случае к наружной поверхности заглушки крепится съемная центрирующая вставка (11). Заглушка вместе со вставкой устанавливается в трубу. После сварки центрирующая вставка снимается с заглушки.

Соединение при МИС, как и при СВз, образуется в результате косоугольного соударения свариваемых поверхностей, приводящего к интенсивным пластическим деформациям и волнообразованию на контактных поверхностях. Однако специфика нагружения метаемого элемента давлением магнитного поля свидетельствует об особенностях в кинематике его движения.

Действие магнитного поля испытывает одновременно весь метаемый элемент, но вследствие рассеяния поля на концах индуктора распределение давления вдоль образующей метаемого элемента неравномерное: меньше по концам и больше в средней части. При таком нагружении метаемый элемент с первоначально прямолинейной образующей, перемещаясь поступательно в направлении действия нагрузки, деформируется и к моменту встречи с неподвижной деталью становится выпуклым. Наличие выпуклости свариваемой поверхности на метаемой детали, обращенной в сторону свариваемой поверхности неподвижной детали, приводит в начальный момент встречи к плоскому соударению. В дальнейшем оно переходит в косоугольное соударение, распространяющееся в общем случае в двух противоположных направлениях от зоны первого контакта. Таким образом, угол соударения γ при магнитоимпульсной сварке изменяется от нуля до максимальной величины в результате изменения кривизны образующей метаемого элемента во время его разгона и продолжения изменения ее в процессе сварки. Изменение угла соударения в процессе сварки вызывает изменение скорости движения фрон-

та контакта. Скорость соударения в процессе сварки также не остается постоянной, а зависит от многих факторов. Поэтому взаимное влияние основных параметров соударения при МИС довольно сложное.

Используя магнитоимпульсную сварку, можно получать качественные соединения однородных и разнородных металлов в воздушной или инертной атмосфере, а также в вакууме с предварительным нагревом свариваемых деталей (или без нагрева).

2.2.4 ВАКУУМНО-ТЕРМИЧЕСКАЯ МАГНИТОИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА (ВТМИО)

В Ростове-на-Дону в НИИ Микротехники разработаны технологические процессы и установки для изготовления целой серии ответственных узлов для электровакуумных приборов и вакуумной техники. Этот процесс называется вакуумно-термическая магнитоимпульсная обработка (ВТМИО). По существу параметров – это МИС, но отличительной чертой ВТМИО соединения различных деталей и материалов является выполнение сварки в вакууме давлением порядка $10^{-1} \dots 10^{-2}$ Па с предварительным подогревом свариваемых материалов и порошковых композиций до температур порядка $(0,5 \dots 0,7) T_{пл}$ соединяемого наиболее легкоплавкого материала, [1].

ВТМИО относится к динамическим методам обработки материалов и основана на преобразовании накопленной электрической энергии в энергию магнитного поля и механическую работу деформации оболочки (или детали). Оболочка используется также для получения импульсных нагрузок при сварке и прессовании композиционных покрытий.

К операциям ВТМИО относятся операции магнитоимпульсной сварки в вакууме (МИСВ) и вакуумно-термическое магнитоимпульсное прессование (ВТМИП). Принципиальная схема ВТМИО представлена на рис. 2.33.

Обрабатываемое изделие (1) с оболочкой (2) предварительно нагревают в вакууме до определенной температуры при помощи индуктора ВЧ (3) и перемещают в зону магнитоимпульсной обработки (в отверстие индуктора (4)).

Принцип обработки заключается в следующем. При включении генератора импульсных токов (ГИТ) разрядный ток (I_1) протекает по индуктору МИО. В зазоре между индуктором МИО (4) и оболочкой (2) создается импульсное магнитное поле (ИМП) индукцией B . Переменное магнитное поле индуцирует в материале оболочки электрический ток (I_2). В результате взаимодействия проводника с током и магнитным полем образуются электромагнитные силы отталкивания, и происходит деформация материала оболочки. Оболочка приобретает ускорение и своей внутренней поверхностью осуществляет давление на обрабатываемое изделие (1).

Так осуществлялся процесс сварки или прессования порошковых покрытий. К основным параметрам ВТМИО относятся:

- 1) остаточное давление газов в вакуумной камере (B), Па;

Сварочные процессы и оборудование

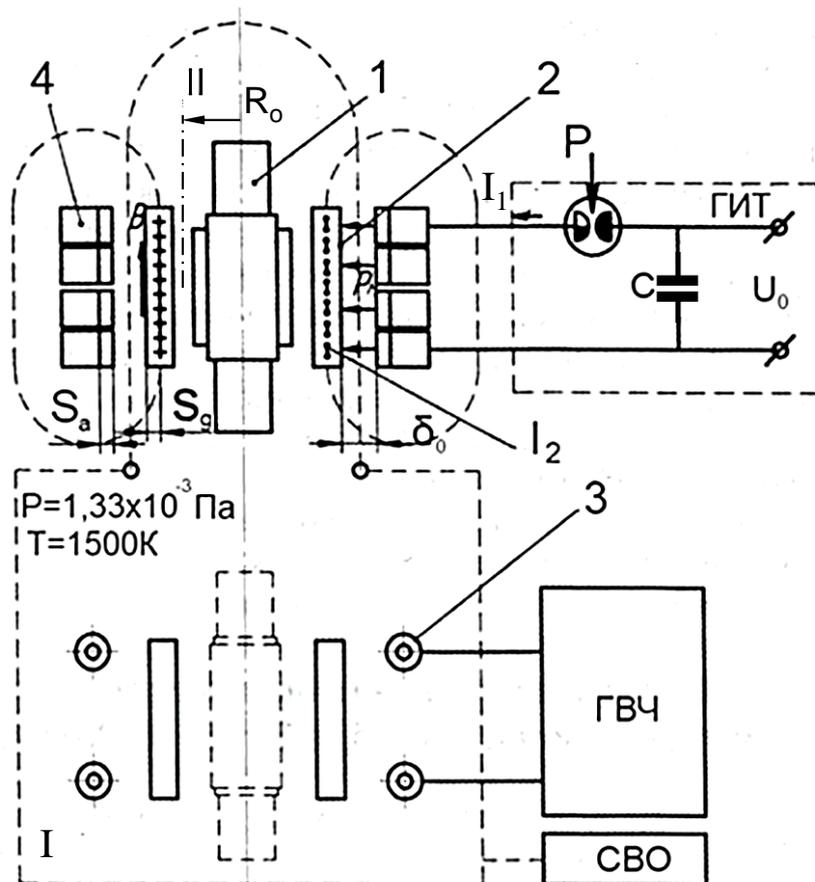


Рис. 2.33. Схема вакуумно-термической магнитоимпульсной обработки: 1 – деталь; 2 – оболочка; 3 – индуктор ВЧ; 4 – индуктор МИО; Р – коммутирующее устройство; С – емкость накопителя МИУ; ГИТ – генератор импульсных токов; ГВЧ – генератор высокой частоты; СВО – средства вакуумной откачки; I_1 – разрядный ток; I_2 – наведенный ток; v – вектор магнитной индукции; p – вакуум; T – температура разогрева детали; S_a , S_g – глубины проникновения магнитного поля в материал индуктора и оболочки соответственно; δ_0 – зазор между индуктором и оболочкой; R_0 – средний радиус зазора; I – предварительный разогрев в вакууме; Π – вакуумно-термическая магнитоимпульсная обработка

- 2) температура предварительного нагрева (T), К;
- 3) удельное электромагнитное давление (PM), Н/м²;
- 4) напряжение заряда (U_0), кВ;
- 5) величина тока (I), кА;
- 6) количество импульсов (N), шт.

Этот процесс был разработан в основном для получения соединений в микротехнике.

На рис. 2.34 (а, б) показаны вторично-эмиссионные катоды мощных электровакуумных приборов.

Особенностью процесса МИС металлов, отличающей его от других известных способов деформирования, является возникновение деформирующих усилий в самом металле. Поэтому МИС осуществляется без передаточных сред, не вызывает значительных сейсмических эффектов и не сопровождается выделением продуктов детонации. Эта особенность МИС металлов позволяет воздействовать на

свариваемые детали в вакууме, защитной атмосфере и других средах магнитным полем индуктора, расположенного вне этих сред.

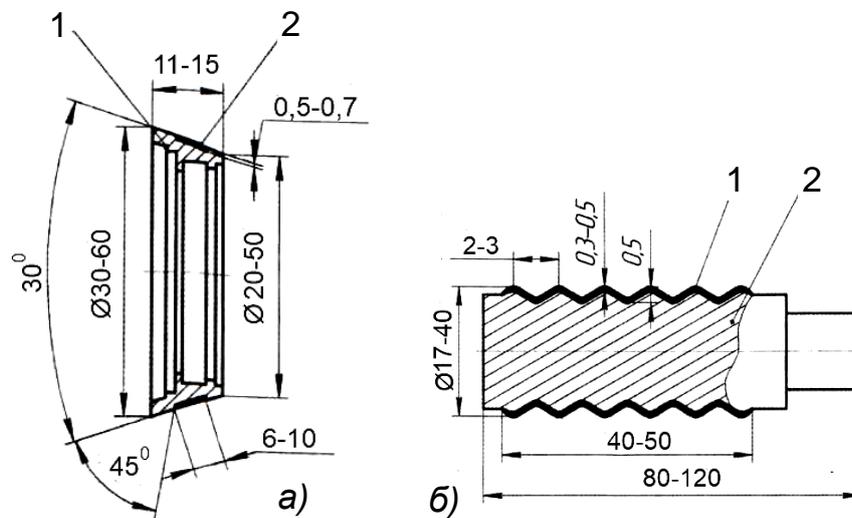


Рис. 2.34: а) 1 – керн-монель, молибден, ниобий, никель; 2 – эмиттер-фольга: платина, платина-барий, палладий, палладий-барий, никель; б) 1 – керн-молибден; 2 – эмиттер – Re+LaB

После МИС не нужна механическая обработка и правка соединения. Прочность сварного соединения не ниже прочности наименее прочной детали. Соединение герметично, обладает вакуумной плотностью и выдерживает вибрационные нагрузки.

Недостатки МИС: давление на метаемую заготовку ограничивается прочностью и долговечностью индуктора; ширина зоны соединения ограничена несколькими десятками миллиметров, поэтому магнитоимпульсную сварку нельзя использовать для плакирования больших поверхностей.

Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте принцип магнитоимпульсной сварки.
2. Какие существуют разновидности процесса магнитоимпульсной сварки?
3. В чём состоит сущность и схема магнитоимпульсной сварки?
4. В чём состоит сущность магнитоимпульсной обработки?

ГЛАВА 3 СВАРОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

3.1 УДАРНАЯ СВАРКА В ВАКУУМЕ (УСВ)

Ударная сварка в вакууме (УСВ) разработана ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР. Этот способ позволяет свести время совместного деформирования металлов при высоких температурах до долей секунды. При этом осуществляют локальный нагрев зоны соединения, а импульсную нагрузку прикладывают однократно, [1].

Локальный нагрев только узкой приконтактной зоны металла осуществляют, например, электронно-лучевым нагревателем. К предварительно нагретым свариваемым поверхностям прикладывают однократную импульсную нагрузку ударником, движущимся со скоростью 1...30 м/с. Ударник, представляет собой груз, который находится вне сварочной камеры и падает свободно или с необходимым ускорением. Нагрузка на детали передается через ходовой шток, фиксирующий положение состыкованных деталей (рис. 3.1).

Масса ударника и скорость перемещения обеспечивают необходимую энергию, идущую на образование качественного сварного соединения. В состыкованных деталях при однократном приложении динамической нагрузки происходит локализация пластической деформации в зоне контакта, мгновенное снятие микронеровностей и образование качественного сварного соединения за доли секунды. При этом общая деформация сварного соединения не превышает 10...15 %.

Цикл сварки ударом (рис. 3.2):

$$T_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$$

где, t_1 – время нагрева до температуры сварки;

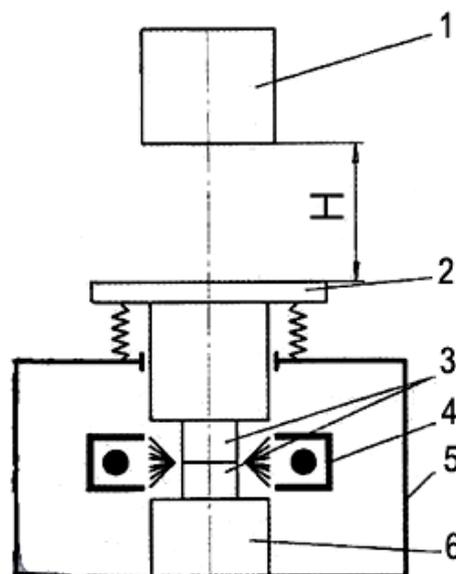


Рис. 3.1. Схема установки для ударной сварки в вакууме: 1 – ударник; 2 – ходовой шток; 3 – свариваемые образцы; 4 – нагреватель; 5 – камера вакуумная; 6 – опора

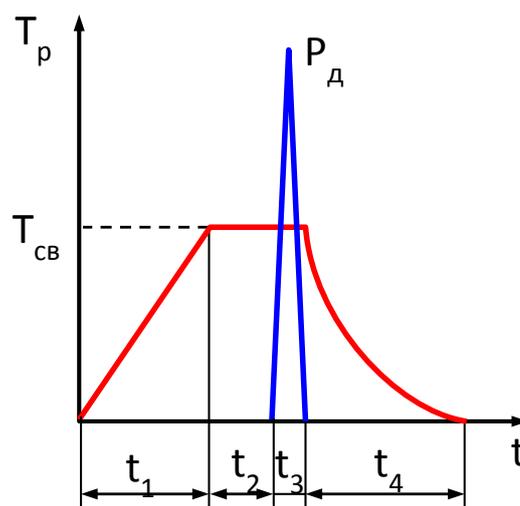


Рис. 3.2 Цикл процесса при сварке ударом (схема)

t_2 – время изотермической выдержки (очистка в вакууме свариваемых металлов от загрязнений и окислов);

t_3 – время приложения импульсной нагрузки, время образования сварного соединения $10^2 \dots 10^3$ с;

t_4 – время охлаждения.

Время образования сварного соединения t_3 при УСВ на несколько порядков ниже, чем при известном способе диффузионной сварки в вакууме.

Параметрами УСВ являются: температура нагрева, энергия удара и скорость приложения нагрузки. Если ударник представляет собой свободно падающее тело, то с учетом трения скорость ударника определяется как

$$v = \sqrt{1,8gH}.$$

Энергия падающего груза определяется массой падающего груза P и высотой падения H : $W = PH$.

Ударная сварка в вакууме успешно применяется для изготовления трубчатых переходников из разнородных материалов. Работоспособность трубчатого титаностального переходника может обеспечить соединение двух труб при создании местного вакуума в стыке за счет специальной муфты. При этом муфта проковывается вместе со свариваемыми кромками труб из титана и стали. Для получения готового трубчатого переходника необходима механическая обработка для удаления стальной муфты после прокатки.

Аналогом рассмотренного способа может служить кузнечная сварка с той разницей, что в случае ударной сварки предварительно нагревают металл до $T_{св}$ только в зоне контакта. Кузнечная сварка имеет два существенных недостатка: значительная ширина слоя интерметаллидов приводит к формированию дефектов в стыке.

Основными технологическими параметрами ударной сварки в вакууме являются температура и энергия удара, обеспечивающая необходимую высокоскоростную деформацию приконтактных объемов свариваемых металлов.

Нагрев свариваемых заготовок до температуры сварки $T_{св}$ осуществляется со скоростью около 20 К/с, чтобы обеспечить локальный нагрев в зоне контакта.

Время изотермической выдержки выбирается с учетом равномерного прогрева свариваемых металлов по глубине в зоне контакта и из условий очистки металлов от оксидов и загрязнений.

Время охлаждения зависит от режимов сварки, размеров изделий и принятой технологии. Исследование различных схем ударного механизма (пороховые копры, линейные двигатели и др.) показало, что наиболее технологичен вариант ударника в виде свободно или с принудительным ускорением падающего груза (рис. 3.1).

Исследования показали, что процесс формирования соединений при УСВ однородных металлов можно условно разделить на две технологические стадии: а) период совместной деформации ($t_{деф} \sim 10^{-2} \dots 10^{-3}$ с) свариваемых металлов, когда происходит образование физического контакта, активация контактных поверхностей с установлением межатомных связей, динамический возврат (релаксация напряжений, аномальное ускорение диффузии); б) период охлаждения ($t =$

10...25 с), когда протекают процессы первичной и собирательной рекристаллизации и идет формирование общих зерен в зоне контакта.

3.2 СВАРКА ЧЕРЕЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ ВЗРЫВАЕМЫЕ ПРОСЛОИ В ВАКУУМЕ (СВЗП)

Развитие и совершенствование современного приборостроения, электронной, авиационной и других отраслей промышленности невозможно представить без применения новых конструкционных и функциональных материалов на основе керамики, ситаллов, кварца, ферритов и других неметаллических материалов. Эти материалы созданы на основе оксидов различных элементов и обладают уникальными физико-химическими свойствами.

Различные соединения керамических материалов с металлами и композиции неметаллических материалов друг с другом широко применяются для крепления элементов высокочастотных систем, для смотровых и волноводных окон, оболочек и корпусов электронных и газоразрядных приборов, для фотокатодов в приборах ночного видения и корпусов лазерных гироскопов.

Традиционные методы получения таких соединений – склеивание и пайка – далеко не всегда обеспечивают высокую прочность, вакуумную плотность, термостойкость, надежный тепловой и электрический контакт, сохранение свойств при длительном хранении.

В настоящее время наиболее перспективным методом получения металл-керамических узлов является *диффузионная сварка в вакууме* (ДС). Возникают задачи, которые практически невозможно решить в рамках традиционных технологических воздействий параметров процессов ДС. Например, весьма трудно получить соединения поляризованной пьезокерамики некоторых феррит-шпинелей и ситаллов с металлами диффузионной сваркой в ее классическом варианте, так как длительное воздействие температур порядка $0,7...0,8 T_{пл}$ (температура плавления) и давлений $0,8...0,9 \sigma_T$ приводят к необратимым изменениям свойств металла или к его разрушению. Поэтому разрабатываются новые методы технологической интенсификации физико-химических процессов в контактной зоне, которые позволили бы получить качественные соединения металл-неметаллических узлов при температурах $0,2...0,3 T_{пл}$ и малых сварочных давлениях.

Явление электрического взрыва проводников (ЭВ) и его многочисленные приложения вылились за последнее время в самостоятельный раздел науки. По мере исследования этого явления выявляется его исключительная сложность, связанная в первую очередь с динамикой фазовых переходов вещества от твердого состояния до плазмы и со взаимодействием различных видов энергии.

Электрическим взрывом обычно называют разрушение проводника при прохождении через него тока большой плотности порядка 10^7 А/см^2 за время $10^{-5}...10^{-7}$ с. В 50-х годах XX века явление ЭВ широко начали изучать в связи с активизацией работ по плазме.

Несмотря на то, что механизм электрического взрыва проводников не полностью ясен, это явление начинает широко использоваться в технике: например,

для получения плазмы высокой плотности, создания импульсов высокого давления, получения высоких температур, имитации взрывов в различных средах и т.д.

Сварка, основанная на использовании явления ЭВ, заключается в том, что при прохождении мощного импульса тока через проводник W при разряде конденсатора C проводник за время $0,2 \dots 10$ мкс превращается в высокотемпературную плазму, конденсирующуюся затем в прослойку на свариваемой поверхности.

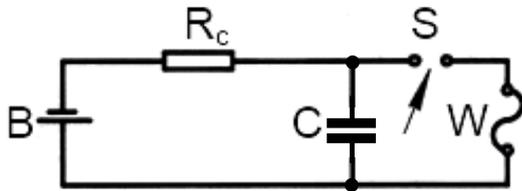


Рис. 3.3. Электрическая схема для исследования низкотемпературной ДС с использованием электрического взрыва проводников: В – источник питания; С – высоковольтный импульсный конденсатор; S – замыкатель электрической цепи; R_c – зарядное сопротивление; W – взрывающийся проводник

Разработанный Г.В. Конюшковым, А.И. Кобловым и А.Н. Балакиным *способ соединения материалов с использованием электрического взрыва прослоев в вакууме (СВзП)* позволяет решить эти проблемы (рис. 3.3).

Предложено также применять электрический взрыв прослоев для сварки диэлектриков. При этом продукты электрического взрыва фольги образуют прослойку между свариваемыми поверхностями. Этот метод может быть особенно полезен при соединении неметаллов (различных керамик, ферритов, ситаллов и полупроводниковых материалов), на свойствах которых отрицательно сказываются высокие температуры.

ваются высокие температуры.

Электрический взрыв проводника в вакууме при сварке характеризуется рядом явлений, наиболее характерными из которых являются высокая удельная энергия конденсирующейся плазмы ($10^{10} \dots 10^{12}$ Дж/кг, $T = 10^5 \dots 10^6$ К); малое время действия сверхвысокой температуры ($t \approx 0,2 \dots 100$ мкс); высокая скорость конденсации ($V \approx 10^3$ мкм/с); интенсивное подтравливание свариваемой поверхности ($\Delta h \approx 2 \dots 20$ мкм).

Сварка с использованием СВзП, как сварка через прослойку в вакууме, имеет некоторые общие черты с ДС в вакууме. Однако надо полагать, что механизм формирования сварной зоны, обуславливающий прочность соединения, существенно отличается от механизма соединения при ДС.

Принципиальными этапами формирования соединения при сварке с применением СВзП, по-видимому, следует считать:

- электрический взрыв токопроводящего прослоя;
- высокоэнергетическое воздействие материала взрывающейся фольги на свариваемые поверхности и формирование прослойки;
- формирование прослоя и взаимодействие соединяемых материалов.

Разработаны две основные схемы применения СВЗП для соединения практически любых металлов и сплавов, металлов с неметаллическими материалами и неметаллических материалов друг с другом.

При *первом способе* соединяемые материалы контактируют друг с другом через взрывающийся прослой.

На рисунке 3.4 показана схема получения соединения диэлектриков.

Сущность способа заключается в следующем: в вакуумную камеру (1) помещают оправку, в которой на рабочем столе (5) и пуансоне (2) закрепляют свариваемые изделия (3). Между ними закрепляют металлический проводник (4), который представляет собой металлическую фольгу толщиной до 150 мкм. При помощи пуансона (2) свариваемые детали нагружают давлением P порядка 3 МПа. К концам фольги через электроды (6) подключают генератор импульсов тока. Камеру вакуумируют и производят нагрев деталей до 673 К. Затем на электроды подают высокое напряжение с энергией, соответствующей испарению фольги.

После изотермической выдержки проводят охлаждение детали. Этим методом получены соединения алюмооксидных, нитридных и бериллиевых керамик друг с другом и в различных сочетаниях. Получены соединения ферритов с керамиками, ситалла с кварцевым стеклом, рубина с рубином. Представляется возможным получать качественные соединения алмазов друг с другом.

По *второй схеме* металл с неметаллическими материалами помещают в вакуумную камеру. Соединение осуществляется через одновременно или последовательно взрывающиеся проводники.

На рисунке 3.5 показана схема способа сварки диэлектриков с металлами.

Сущность способа заключается в том, что в вакуумную камеру (7) в оправке на рабочем столе (12) и пуансоне (8) закрепляют через слюдяные прокладки (9, 11) свариваемые детали (1, 6). На высоковольтных электродах закрепляют металлические проводники (2, 3, 4, 5). Камеру вакуумируют, свариваемые детали разносят и производят

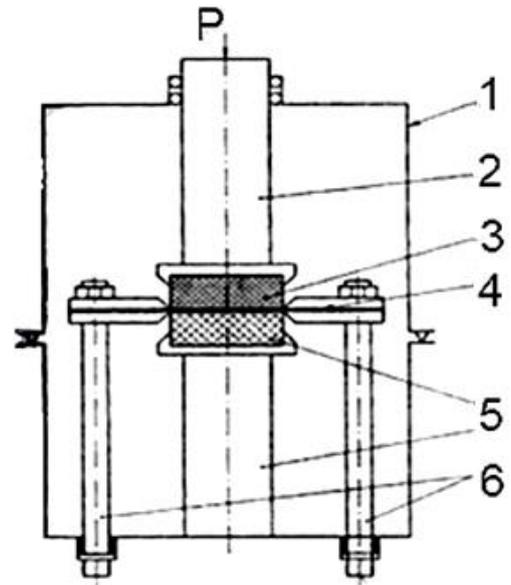


Рис. 3.4. Сварка с использованием СВЗП (схема 1)

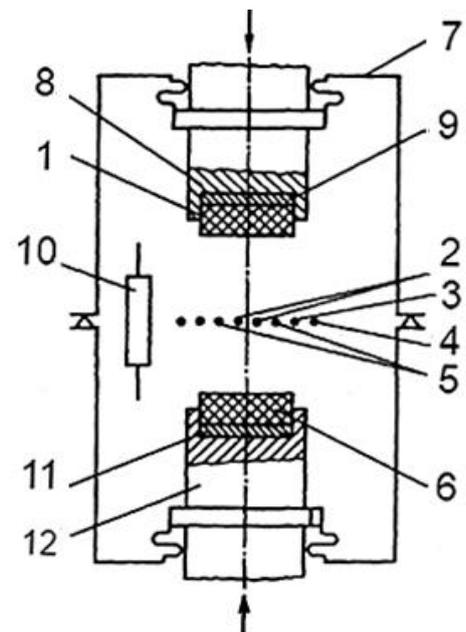


Рис. 3.5. Схема способа сварки диэлектриков с металлами

нагрев до 673 К нагревателем (10). После чего металлический проводник испаряется за счет их электрического взрыва, и свариваемые детали приводятся в контакт и механически нагружаются давлением не менее 10 МПа.

Необходимость использования множества проводников вызвана тем, что в этом случае имеется возможность электрического взрыва проводников в режиме протравливания свариваемой поверхности с последующим формированием прослоя с заданными технологическими и теплофизическими свойствами за счет изменения расстояния между свариваемыми поверхностями и выбора материала проводников для прослоев.

Контрольные вопросы

1. Где применяется сварка через электрически взрывающиеся прослой в вакууме?
2. Что называется электрическим взрывом?

3.3 ИНДУКЦИОННАЯ СВАРКА МЕТАЛЛОВ

Индукционная сварка (ИС) – это сварка давлением, при которой поверхности, подлежащие соединению, нагреваются до сварочных температур с помощью токов высокой или повышенной частоты, [1, 2].

Для высокочастотного нагрева характерны два основных эффекта: поверхностный эффект и эффект близости.

Если через электропроводную шину пропустить переменный ток с частотой f то, кроме электродвижущей силы (Э.Д.С.) источника питания, в шине будут наводиться встречные Э.Д.С. самоиндукции, которые будут наиболее сильными внутри шины. В результате взаимодействия электродвижущих сил электрическое поле во внутренних частях шины будет ослаблено, и ток по сечению будет распределен неравномерно. Большая часть тока будет протекать через приповерхностные слои, что и обуславливает поверхностный эффект.

Поверхностный эффект состоит в том, что плотность тока высокой частоты будет максимальной на поверхности тела и минимальной в центре тела. Увеличение плотности тока от центра к поверхности проводника происходит по экспоненциальному закону. Чем выше частота тока, электропроводность и магнитная проницаемость, тем меньше будет глубина проникновения тока:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \gamma}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \gamma}} = k \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}},$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление; μ – относительная магнитная проницаемость; f – частота тока; k – коэффициент пропорциональности; γ – удельная электропроводность.

Глубину проникновения тока при нагреве металла можно вычислять по уравнению:

Сварочные процессы и оборудование

- для меди – $\delta = \frac{70}{\sqrt{f}}$ мм;
- для магнитной стали при температуре выше точки магнитных превращений – $\delta = \frac{500}{\sqrt{f}}$ мм;
- ниже точки магнитных превращений – $\delta = \frac{32,50}{\sqrt{f}}$ мм.

Поверхностный эффект обеспечивает высокую плотность тока в приповерхностных слоях, концентрацию выделения в них энергии и быстрый нагрев металла.

Магнитная проницаемость ферромагнитных материалов зависит от их температуры и напряженности магнитного поля, которая с увеличением обоих параметров уменьшается и при переходе через точку Кюри равняется единице. Поэтому плотность тока и плотность тепловой мощности изменяется при нагреве. Выше точки Кюри глубина проникновения тока увеличивается приблизительно в 15 раз. При увеличении частоты глубина проникновения тока уменьшается. Поэтому при нагреве массивных деталей до высокой температуры по всему сечению выбирают меньшие частоты, а при необходимости нагрева лишь тонкого поверхностного слоя – высокие. При достаточно высоких частотах (440...500 кГц) теплота выделяется в тонком слое. Время нагрева поверхности до высоких температур, в том числе и до температуры плавления, может равняться долям секунды, чему способствует и эффект близости.

Эффект близости проявляется при прохождении переменного тока в системе проводников. Если через две параллельные токопроводящие шины пропустить токи, направленные противоположно друг другу (рис. 3.6, а), то магнитные потоки от обоих токов будут иметь одинаковое направление и складываться, а на внешних сторонах проводников потоки будут направлены навстречу друг другу и ослабятся.

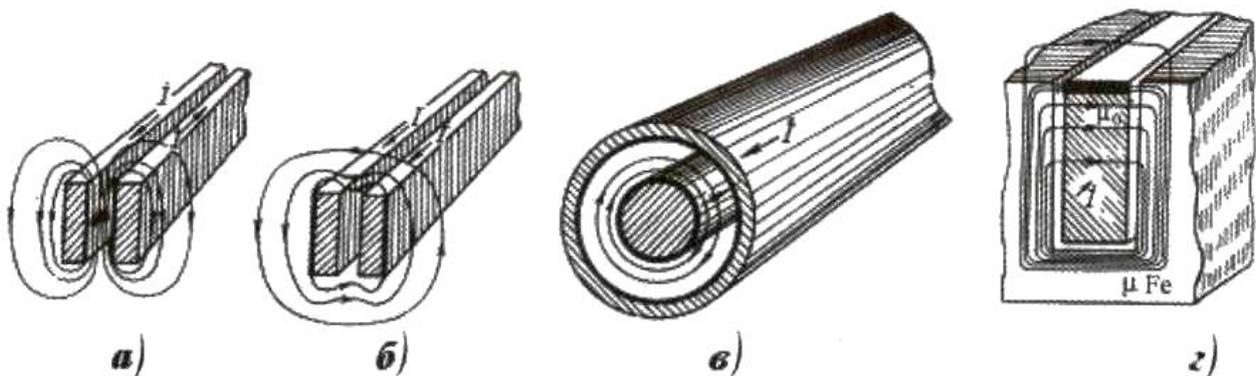


Рис. 3.6. Эффект близости в параллельных проводниках и влияние магнитопровода на распределение токов в проводнике: а – противоположно направленные токи в плоских шинах; б – одинаково направленные токи в плоских шинах; в – противоположно направленные токи в коаксиальных проводниках; г – проводник с магнитопроводом

Поэтому напряженность магнитного поля между проводниками увеличивается, а вне проводников - уменьшается. Индуктированные токи, которые наводят проводники, на внутренних сторонах усиливают ток от источника. На участках с наибольшей напряженностью магнитного поля существует наибольшая плотность тока. Поэтому плотность тока на внутренних поверхностях проводника больше, чем на внешних поверхностях. При ярко выраженном поверхностном эффекте ток проходит по внутренним сторонам шин. Аналогичное распределение токов в шинах будет, если по одной шине протекает ток от источника электроэнергии, а по другой – индуктированный ток.

В случае одинакового направления токов в шинах (рис. 3.6, б) напряженность магнитного поля между шинами уменьшается, а вне шин увеличивается. Плотность тока на внутренней стороне шины будет меньше, чем на внешней стороне. При ярко выраженном поверхностно эффекте в этом случае ток практически будет проходить по тонкому слою с внешней стороны каждой шины.

Это явление неравномерного распределения тока по периметру сечения проводников называют *эффектом близости*. Эффект близости способствует еще большей концентрации энергии в поверхностных слоях нагреваемого металла. Он проявляется тем сильнее, чем меньше расстояние между проводниками и больше частота тока.

На рис. 3.6, в показан вариант протекания токов встречного направления по коаксиально расположенным цилиндру и трубе. В этом случае ток проходит по внешней поверхности цилиндра и внутренней поверхности трубы.

На распределение тока в проводнике сильно влияет наличие магнитопровода, если поместить медный проводник прямоугольного сечения с переменным током в паз магнитопровода из пластин железа или феррита. В этом случае проводник будет с трех сторон окружен ферромагнитным материалом с большим удельным электрическим сопротивлением (рис. 3.6, г). Магнитная проницаемость железа намного выше, чем меди. Поэтому ниже дна паза весь магнитный поток будет проходить в железе. При таком распределении магнитного потока в нижней части проводника, лежащего на дне паза, будет наводиться электродвижущая сила самоиндукции больше, чем в верхней, где напряженность магнитного поля меньше. В результате суммарная плотность тока в верхней части проводника будет больше, чем в нижней. Эта неравномерность возрастает с увеличением глубины паза и частоты тока, проходящего по проводнику. Поэтому можно считать, что почти весь ток будет находиться в открытой поверхности проводника. Этим приемом пользуются для концентрации теплоты в нужных местах и повышения эффективности нагревательного устройства.

Поэтому, при высокочастотном нагреве тепловая энергия выделяется непосредственно в массе металла, а наличие поверхностного эффекта и эффекта близости, а также применение магнитопровода обеспечивают концентрацию энергии в нужных местах изделия, его быстрый нагрев в зоне сварки и высокую эффективность метода нагрева.

Для сварки токами высокой частоты применяют два способа передачи энергии: **контактный (кондукционный)** и **индукционный**.

При контактном способе на расстоянии 30...200 мм от места сварки поверхностей на них накладывают контакты, к которым от высокочастотного генератора подводят ток высокой частоты, обычно радиочастоты (больше 60 кГц), рис. 3.7.

Вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости наибольшая часть тока проходит вдоль поверхностей и замыкается вместе их схождения. Часть тока замыкается по периметру внутри трубы. Этот ток можно уменьшить, расположив внутри трубной заготовки магнитопровод. Для подведения тока разработаны специальные сварочные устройства, в которых используют скользящие контакты или контактные ролики. В обоих случаях контактные элементы работают в трудных условиях. Поэтому их изготавливают из бронзы, вольфрама или молибдена.

Применение высокочастотного нагрева позволяет получить более высокую концентрацию энергии, чем при контактной и дуговой сварке. Ширина зоны термического влияния составляет 0,1...0,15 мм.

Высокочастотной сваркой изготавливают прямошовные трубы (из сталей, алюминиевых сплавов, латуни и др.) малого и среднего диаметров (12...150 мм) при толщине стенки 0,8...6 мм, а также большого диаметра (400...600 мм) при толщине стенки до 8 мм. Наряду с основными их потребителями (машиностроение и строительные конструкции), они находят все большее применение в нефте- и газодобыче. Так, в США производство сварных труб для этих целей достигло 30% от общего выпуска; крупные мощности по производству обсадных и насосно-компрессорных труб введены в Японии. В ряде стран применяется высокочастотная сварка при производстве прямошовных труб большого (450...1220 мм) диаметра с толщиной стенки до 16 мм из листов длиной 12 м.

При индукционной сварке (ИС) детали нагревают или вихревыми токами, наводимыми магнитным полем, создаваемым близко расположенным к изделию индуктором, подключенным к генератору токами высокой частоты (индукционная схема), или протекаемым током в случае, когда изделие включено непосредственно в цепь высокочастотного генератора (кондукционная схема токоподвода).

Этим методом можно соединять черные и цветные металлы и их сплавы, а также пластмассы и синтетические ткани.

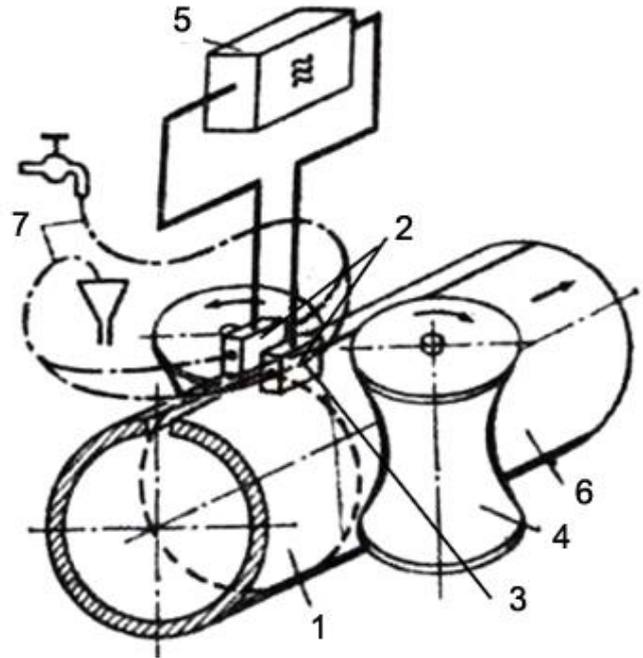


Рис. 3.7. Сварка токами высокой частоты с контактными электродами: 1 – не сваренная часть трубы; 2 – скользящий контакт тока высокой частоты; 3 – зона токопрохождения на трубе; 4 – пара нажимных роликов; 5 – генератор высокой частоты; 6 – свариваемая труба; 7 – охлаждение водой

При индукционном подводе тока соединяемые трубы перед обжимными валками проходят в непосредственной близости от трансформатора или индуктора. Две кромки трубы, расположенные с диаметрально противоположных сторон, подаются друг к другу под некоторым углом, образуя щель V-образной формы. При прохождении под индуктором в свариваемых деталях индуцируются вихревые токи, направленные противоположно току в индукторе.

Встречая на своем пути V-образную щель, ток отклоняется к вершине угла схождения. В силу эффекта близости и поверхностного эффекта ток концентрируется в основном на свариваемых участках поверхностей, обращенных друг к другу, тем самым обеспечивая быстрый нагрев металла до температуры сварки.

Нажимные ролики обеспечивают контакт свариваемых кромок трубы.

Существует большое разнообразие схем ИС. Среди них можно выделить следующий ряд основных технологических схем.

Свариваемые кромки необходимо обработать до металлического блеска (допускается прокатная окалина), но на них не допускаются заметные неровности.

Сварка по этой схеме приметается для изделий, имеющих замкнутое поперечное сечение. Она целесообразна для непрерывной последовательной шовной сварки труб.

На рис. 3.8 показана схема сварки труб вращающимся трансформатором.

Принципиальная схема сварки труб со стержневым индуктором показана на рисунке 3.9.

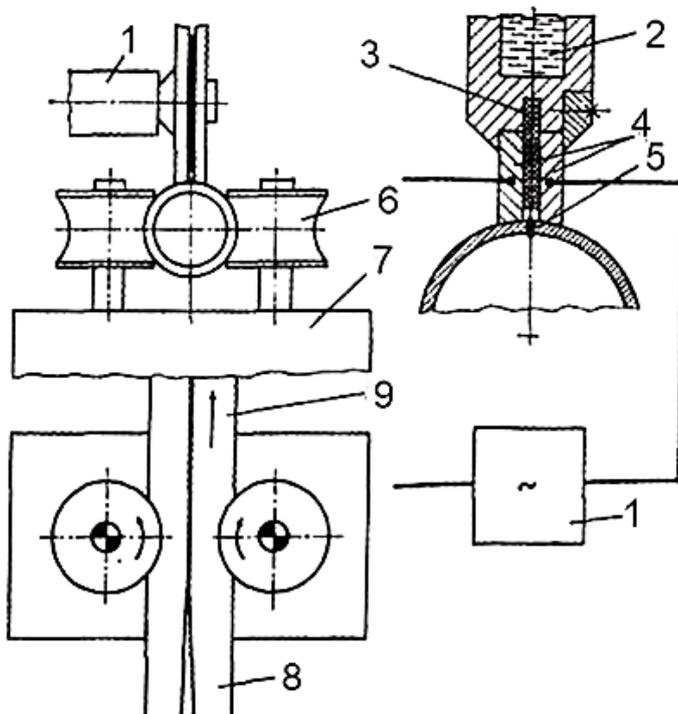


Рис. 3.8. Сварка вращающимся трансформатором труб с пазом: 1 – сварочный трансформатор (вращающийся трансформатор); 2 – охлаждение; 3 – изоляция; 4 – роликовые электроды; 5 – сварочный шов; 6 – боковые нажимные ролики; 7 – стол; 8 – труба с пазом; 9 – сваренная часть трубы

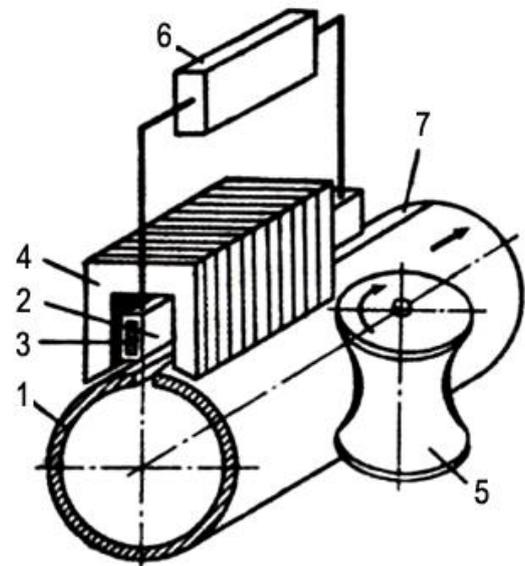


Рис. 3.9. Сварка труб со стержневым индуктором: 1 – несваренная часть трубы; 2 – токопроводящая шина; 3 – охлаждающий канал; 4 – магнитное ярмо; 5 – пара нажимных роликов; 6 – индукционный генератор; 7 – сваренная часть трубы

На рис.3.10 показана схема продольной сварки труб с кольцевым индуктором. Этот метод может применяться для сварки труб диаметром 10...100 мм с толщиной стенок 0,5...15 мм из низкоуглеродистых и высокоуглеродистых сталей, нержавеющей и кислотостойких сталей, труб из цветных металлов - меди, латуни, бронзы, алюминия и их сплавов.

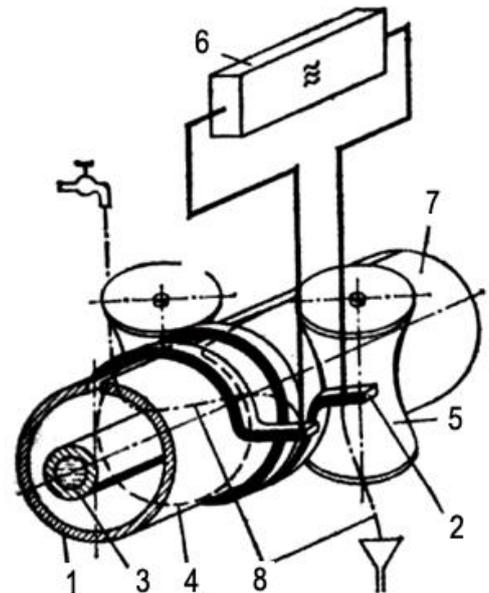


Рис. 3.10. Сварка токами высокой частоты (ТВЧ) с кольцевым индуктором: 1 – шлицевая труба; 2 – кольцевой индуктор; 3 – магнитный сердечник (используется при малом диаметре труб); 4 – зона токопрохождения; 5 – пара нажимных роликов; 6 – генератор высокой частоты; 7 – сваренная часть трубы; 8 – охлаждение водой

С увеличением диаметра труб эффективность охватывающих индукторов резко снижается, наиболее эффективным оказался подвод тока с помощью внутренних индукторов или по совмещенной системе, использующей одновременно как охватывающие, так и внутренние индукторы. Основным эффектом от применения внутренних индукторов связан с возможностью уменьшения потерь в теле трубной заготовки.

В результате большого удельного давления образуется значительный грат, который следует удалить из зоны сварки. При последовательном расположении стержневых индукторов одинаковой или различной мощности можно проводить предварительный и окончательный нагрев, а также сварку труб с большой толщиной стенок.

С помощью сварки изготавливают высококачественные стальные трубы в соответствии с условиями поставки на сварные стальные трубы.

Стыковая сварка с охватывающим индуктором (рис. 3.11) соответствует стыковой контактной сварке.

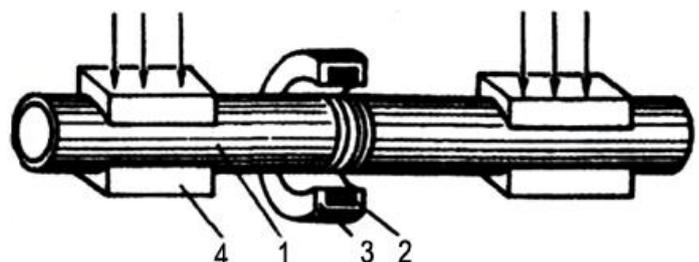


Рис. 3.11. Схема стыковой высокочастотной сварки труб: 1 – свариваемая труба; 2 – индуктор; 3 – магнитопровод; 4 – зажимы для фиксации свариваемых труб и создания осадки

Имеющийся зазор между индуктором и изделием позволяет сваривать горячекатаный материал без специальной обработки поверхности и торцов заготовки.

3.3.1 ТЕХНОЛОГИЯ ИС

Процессы высокочастотной сварки можно разделить на три группы:

- 1 – сварка плавлением (без давления);
- 2 – сварка давлением с оплавлением;
- 3 – сварка давлением без оплавления.

Основными параметрами режима ИС являются: температура, давление, величина осадки, скорость сварки (движения заготовки). Используются генераторы с частотой 2,5...500 кГц. Частота тока должна соответствовать толщине металла, скорость движения трубной заготовки – мощности сварочного устройства. Для уменьшения мощности сварочного устройства при индукционном нагреве необходимо стремиться, чтобы зазор между трубной заготовкой и индуктором был по возможности меньшим (1,5...2,0 мм). Это повышает коэффициент полезного действия индуктора.

Сварка давлением без оплавления обычно выполняется также с применением защиты металла. Скорость нагрева при этом способе не превышает 400 °С/с, осадка составляет 2,5...6,0 мм, скорость осадки – 20 мм/с.

Наибольшее распространение получила индукционная стыковая сварка труб, выполняется она по схеме, показанной на рис.3.11. Бесперывная продольная сварка труб – по схеме, представленной на рисунках 3.9 и 3.10. На режим сварки влияет и среда. Сварка низкоуглеродистых сталей с индукционным нагревом без использования флюсов или защитных газовых сред возможна лишь при температурах 1380...1400 °С. При температурах 1370 °С и ниже в сварных соединениях появляются включения оксидной пленки закиси железа FeO. Температура плавления пленки FeO зависит от содержания в ней кислорода, который находится в пределах 23,16...25,6 % и изменяется от 1371 до 1424 °С. FeO в сварных соединениях содержит 23,3 % кислорода и имеет температуру плавления 1371...1375 °С. Поэтому стабильное качество сварных соединений обеспечивают температуры выше 1380 °С, если не применяется защитная среда.

Использование защитной среды позволяет снизить температуру сварки до 1200 °С при давлении 40...50 МПа. Для защиты применяют природный газ или жидкий флюс в виде 10% раствора нитроклечатки в метиловом спирте. Сметанообразный раствор наносят на внутреннюю поверхность трубы кольцом шириной 10...15 мм. На торцевые поверхности флюс не наносят. При нагреве флюса образуется газовая фаза, которая содержит окись углерода, углеводороды и значительное количество молекулярного водорода и имеет восстановительный характер. Положительное действие флюса сохраняется весь период сварки, поскольку процесс сварки кратковременный (2...8 с).

Частота тока для индукционного нагрева выбирается из расчета обеспечения глубины проникновения наведенного тока в 2...3 раза больше толщины стен-

ки. Это позволяет нагреть металл до температуры сварки за несколько секунд и даже долей секунды.

3.3.2 СВАРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИС

Оборудование для ИС по характеру производства является мелкосерийным и единичным. Оно состоит из высокочастотного генератора, нагревательного устройства, устройства для создания давления.

Для осуществления сварки используются частоты тока 8, 10, 66, 220, 440, 1760 кГц, что определяет применение различных источников питания. При частоте 8 и 10 кГц источниками питания являются электромашинные преобразователи, состоящие из двигателя, включаемого в сеть, с частотой тока 50 Гц и индукторного генератора, соединенных общим валом, и инверторы.

Технические характеристики электромашинных преобразователей частоты и инверторов, используемых для сварки приведена в табл. 3.1.

Таблица 3.1.

Параметры	Преобразователь		Инвертор
	ВПЧКЮ-8000	ППЧВ-250-10	СЧГЗ-100/10
Частота тока, Гц	8000	10000	10000
Мощность, кВт:			
генератора	100	250	100
двигателя	138	304	
Напряжение, В:			
генератора	800	800	400
двигателя (сети)	380 (220)	6000(3000)	380
Коэффициент мощности нагрузки (емкостной)	0,9	380* 0,95	1
Масса, кг	2610	3620	870
Габаритные размеры, мм:			
высота	1686	1770	2000
диаметр	860	1154	1605

При использовании частот 66, 220, 440 и 1760 кГц в качестве источников питания применяют ламповые генераторы, в которых ток промышленной частоты с помощью выпрямителей, трехэлектродных вакуумных ламп и резонансных колебательных контуров преобразуется в ток высокой частоты. Составными элементами ламповых генераторов являются следующие функциональные блоки: входное коммутирующее устройство, повышающий анодный трансформатор, высоковольтный выпрямитель, блок генераторной лампы, анодный колебательный контур и нагрузочный контур. Технические характеристики высокочастотных ламповых генераторов приведена в табл. 3.1. Оборудование сварки чаще всего используется при изготовлении изделий бесконечной длины (трубы, прокат, оболочки кабелей).

В комплект оборудования для производства прямошовных и спиральных труб, кабелей, оребренных труб и других изделий, входит следующее механиче-

ское оборудование: устройство для подачи и подготовки рулонов металла; машины для сварки рулонов в бесконечную ленту; клетки для формовки трубных и других заготовок; клетки для обжатия заготовки в процессе сварки; ножницы для резки сваренных изделий на мерные доли и др. Установки для изготовления труб включают специальное высокочастотное электросварочное оборудование, состоящее из источника питания, электромашинного преобразователя или лампового генератора и устройств подвода тока к подготовленной для сварки заготовке. Подвод тока осуществляется контактным или индукционным способом.

Прямошовные трубы диаметром 200...530 мм с толщиной стенки менее 10 мм свариваются чаще всего при частоте тока 10 кГц. Источником питания являются электромашинные преобразователи мощностью 250 кВт. При движении труб со скоростью до 60 м/мин. требуются четыре преобразователя, работающие параллельно на одну нагрузку. Их устанавливают в отдельном помещении на расстоянии менее 100 м от сварочного узла трубоэлектросварочного стана.

При изготовлении спирально-шовных труб возможно стыковое и косостыковое соединение кромок. При стыковом соединении ленту предварительно формируют по расчетному профилю, а затем переформируют по профилю трубы, что резко усложняет конструкцию трубосварочного стана. При косостыковом соединении формирование простое. Станы могут быть трех видов: втулочными, валково-втулочными и валковыми. Два последних вида станов отличаются более высокой точностью сведения кромок. При безвтулочном формировании трубы (валковые станы) применяется автоматическое регулирование диаметра.

При изготовлении изделий с тавровым соединением профилей оребренных труб механическое оборудование деформирует полку или ребро, чтобы обеспечить V-образное схождение кромок с поверхностью. Возможности осуществления такой деформации определяют и возможности применения высокочастотной сварки. Несимметричность нагрева компенсируют концентраторами тока, экранами, конструктивно объединенными с контактным токоподводом.

В промышленности индукционный метод током с частотой 50 Гц применяется для нагревания массивных деталей при сварке, наплавке и термической обработке. Установки проектируются обычно для стандартного напряжения (127, 220, 380 В) и подключаются непосредственно к промышленной электрической сети. Мощность при нагреве токами промышленной частоты регулируется с помощью тиристорных преобразователей или изменением соотношения емкости конденсаторов, включающихся последовательно и параллельно индуктору.

Кроме рассмотренных успешно эксплуатируются установки и машины для сварки корпусов конденсаторов и аккумуляторов, корпусов компрессоров холодильных агрегатов, тройников глушителей автомобилей и др. Основным элементом всех машин, определяющим качество сварки изделий, является *индуктор*. Он выполняется, как правило, одновитковым, повторяющим форму сварного соединения. С целью увеличения службы индуктора его рабочая часть заливается прочной электроизоляционной и теплостойкой массой. Индуктор совмещается с керамической насадкой, обеспечивающей равномерную подачу защитного газа в процессе сварки.

К недостаткам высокочастотной сварки следует отнести сложность при сварке изделий, особенно труб конечной длины, поскольку невозможно избежать непроваров в начале и в конце сварного шва.

Преимущества сварки ТВЧ с индукционным подводом следующие:

- быстрый нагрев;
- продолжительный срок службы индуктора;
- отсутствие на свариваемых деталях под индуктором рисок, царапин и др.

К недостаткам указанного способа следует отнести:

- сложность поддержания равномерного зазора между индуктором и поверхностью свариваемых деталей;
- сравнительно высокую потребляемую мощность из-за растекания тока по поверхности трубы вне зоны сварки и трудность сосредоточения разогрева в зоне сварки.

3.4 ИНДУКЦИОННАЯ СВАРКА ПЛАСТМАСС

Сварка пластмасс представляет собой соединение термопластических материалов одинакового или различного типа с применением тепла и давления или без давления, а также с применением или без применения добавок из такого же или отличного от них материала.

Сварка происходит в пределах термопластичного состояния материала. При этом свободно перемещающиеся молекулярные цепи связываются в поверхностях контакта соединяемых деталей. Сварной шов охлаждается под давлением и в свободном состоянии.

В зависимости от поведения пластмасс под действием теплоты их разделяют на *термореактивные*, которые могут быть сварены методом химической сварки, и *термопластичные*. Последние под действием теплоты переходят в пластическое, текучее состояние, а при охлаждении восстанавливают свои первоначальные свойства, что позволяет осуществить их соединение методами диффузионной сварки с помощью разогрева зоны соединения нагретым инструментом, горячим воздухом, трением, инфракрасным излучением и т.д.

Высокочастотная сварка пластмасс является разновидностью диффузионной тепловой сварки. Разогрев и размягчение материала осуществляются под действием теплоты, выделяющегося непосредственно в свариваемых деталях в результате взаимодействия молекул материала термопласта с высокочастотным электрическим полем, возбужденным сварочными электродами. Последнее обстоятельство определяет *преимущества высокочастотного метода сварки:*

- высокая производительность;
- возможность изготовления изделий со сложным расположением сварных швов за одну операцию;
- высокая культура производства;
- низкие требования к квалификации оператора-сварщика.

Этот способ предъявляет к термопластам специальные требования в части их электрических свойств. Например, полиэтилен невозможно сварить высокочастотным методом, но такой материал как поливинилхлорид, находящий широкое применение при изготовлении разнообразных изделий в различных отраслях промышленности, хорошо сваривается этим методом.

Высокочастотная сварка пластмасс может быть осуществлена как при нагреве в электрическом поле высокой частоты (за счет диэлектрических потерь) (рис. 3.12), так и в магнитном поле (индукционный нагрев) (рис.3.13).

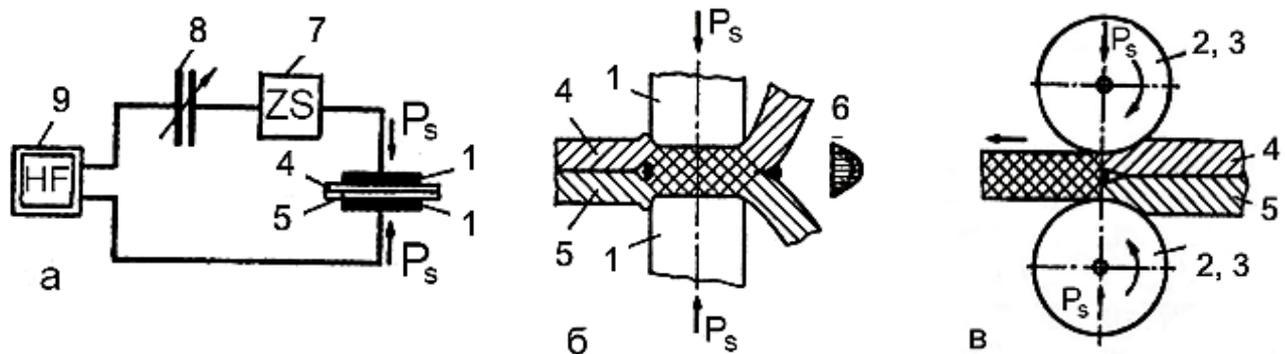


Рис. 3.12. Способы сварки пластмасс в электрическом поле: *a* – принципиальная схема; *б* – прерывистая сварки; *в* – непрерывная сварка; 1 – плоские электроды; 2 – круглые электроды; 3 – нажимные и транспортные ролики; 4, 5 – свариваемые детали; 6 – распределение температур; 7 – реле времени; 8 – регулировочный конденсатор; 9 – высокочастотный генератор

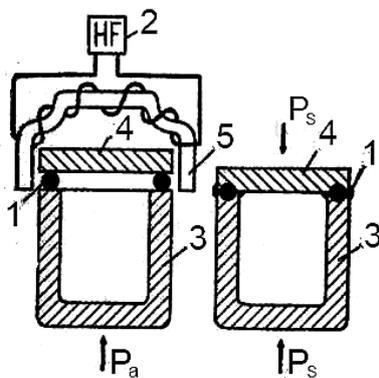


Рис. 3.13. Принципиальная схема сварки в магнитном поле: 1 – виток индуктора (хромоникелевая или медная проволока диаметром 0,4-1,0 мм); 2 – генератор высокой частоты; 3, 4 – свариваемые изделия; 5 – индуктор ($f = 27,12$ МГц)

Из всех способов *сварки нагревом в электрическом поле высокой частоты* – роликового (непрерывно-последовательная), шагового (по принципу швейной машины), ручного (с помощью клещей или другого инструмента), прессового – последний способ сварки является наиболее универсальным и технологичным. Он позволяет, подобно штамповке, точно и многократно повторять операцию сварки по заданной конфигурации. Кроме того, прессовый способ позволяет сваривать не только пластифицированные пленки, но также не пластифицированные термопласты: винилпласт, полиамиды и т.д.

Сварочные электроды являются основным рабочим органом сварочных устройств. При их конструировании необходимо учитывать, что для активного

нагрева материала под сварку наибольшую напряженность электрического поля желательно иметь в пространстве между электродами. С этой целью края кромок сварочных электродов должны быть закруглены так, чтобы между электродами было относительно однородное с максимальной напряженностью электрическое поле.

Опытами высокочастотной сварки установлено, что радиус закругления кромок электродов должен быть близким к $1/8$ ширины его рабочей зоны. Ширина шва рабочей зоны приблизительно равна двойной толщине свариваемого пакета.

Конструкция электрода зависит от размера и конфигурации изделия, от вида сварного соединения и от того, следует ли одновременно со сваркой производить обрезку материала. На рис. 3.14 представлены виды сварных соединений и варианты размещения электродов в процессе сварки.

При использовании электродов, приведенных на рис. 3.14 (а, б, ж) сварка может быть произведена как без обрезки материала, так и с его обрезкой. В последнем случае электрод снабжается обрезной кромкой. Расположение электродов (рис. 3.14, д) используется при сварке труб, а также в тех случаях, когда невозможно расположить электроды с двух противоположных сторон сварного шва, например, при сварке встык линолеума на теплоизоляционной прокладке. На рис. 3.14, в схематически изображены так называемые «встречные электроды».

Под названием «встречный электрод» понимают, как правило, соответствующую сварочному электроду встречную форму, выполненную из расчета зеркального отражения сварочного электрода или близкого к нему. Отклонение формы встречного электрода от зеркального отражения сварочного электрода состоит в основном в том, что основной электрод снабжается режущей кромкой, которая отсутствует у «встречного электрода».

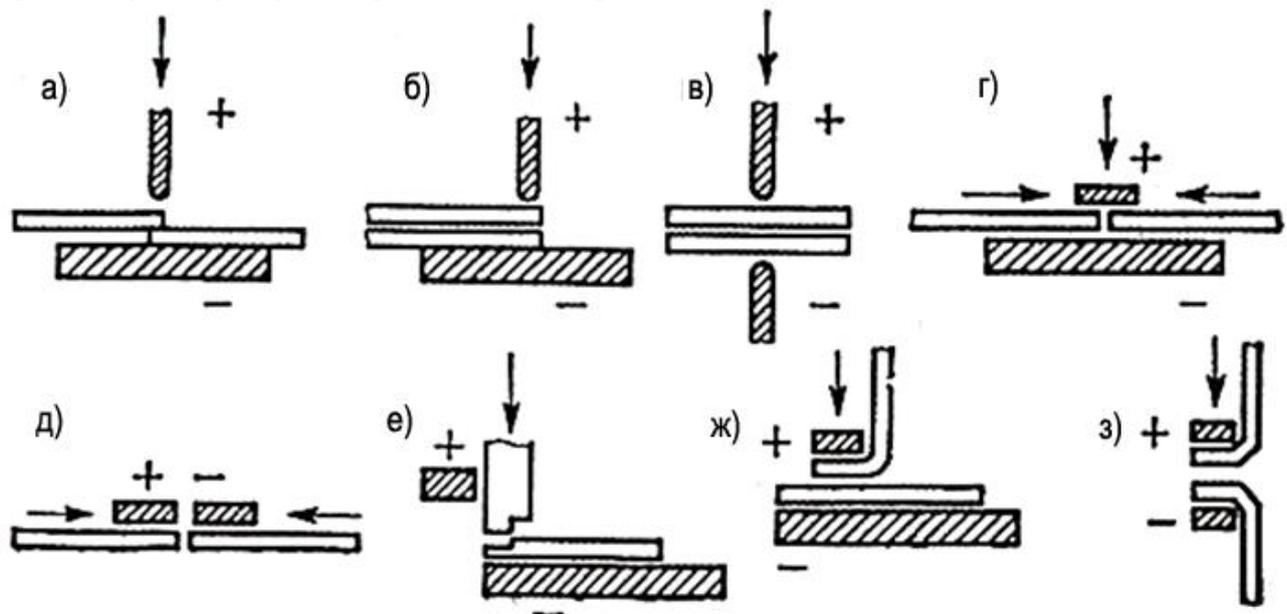


Рис. 3.14. Образцы сварных швов и варианты размещения электродов при сварке: а, б, в – внахлест; г, д, е – встык; ж, з – с отбортовкой.

Знак (+) обозначает высоковольтный электрод, знак (-) – заземленный электрод

При сварке со встречными электродами сварной шов формируется с обеих сторон свариваемого изделия, что позволяет получить сварные швы с более высокими прочностными показателями. Кроме того, сварка встречными электродами используется еще и при изготовлении таких изделий, у которых с противоположной стороны шва нежелательно получать плоскую поверхность из эстетических соображений, например, при изготовлении таких изделий, как портсигар, футляры для очков и т.п.

3.5 ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СВАРКА ДЕТАЛЕЙ ОДЕЖДЫ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ

Наряду с преобладающим в настоящее время методом ниточного соединения деталей одежды большой значение приобретает новый метод соединения – сварка.

Замена ниточных швов сварными швами позволяет устранить ряд недостатков, связанных с обработкой изделий из синтетических материалов на обычных швейных машинках: стягивание шва в процессе пошива, расшатывание мест прокола в процессе носки, низкую износостойчивость, прорубаемость ткани иглой, водопроницаемость шва.

Кроме того, применение высокочастотного метода сварки значительно повышает производительность труда, создает возможность автоматизации производства.

С точки зрения свариваемости *ткань* и *трикотаж* можно разделить на две группы. Физической основой этого разделения являются различия в их диэлектрических свойствах.

Ткани и трикотаж из 100 % полиамидных волокон свариваются в электрическом поле с частотой тока 27,12 МГц и выше. Ткани и трикотаж с различным содержанием термопластичных, полиэфирных и полиакрилонитрильных волокон в смеси с вискозными и натуральными волокнами растительного (хлопок, лен) и животного (шерсть) происхождения свариваются в электрическом поле с частотой тока 81 МГц и выше.

Рассмотрены обычно применяемые три вида швов: стачной, накладной двойной и накладной одинарный (рис. 3.15). Прочность сварного шва зависит от вида шва. Так, для образцов, имеющих ширину сварного шва 50 мм и зажимную длину 100 мм, прочности сварных швов следующие: стачные швы – 60...100 Н; накладные – 100...240 Н; накладные с закрытым срезом – 130...300 Н.

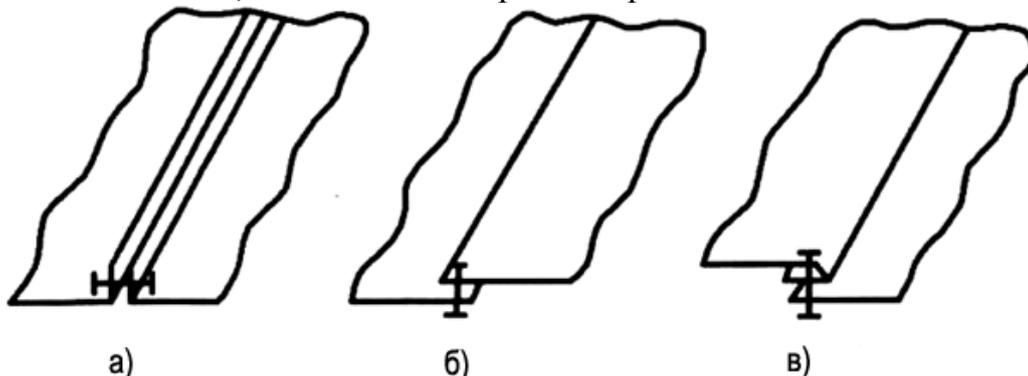


Рис. 3.15. Виды сварных швов при сварке синтетических тканей: *а* – стачной; *б* – накладной; *в* – накладной с закрытым отрезом

В связи с малой толщиной свариваемых плащевых тканей от 0,12 до 0,22 мм сварку следует производить с использованием технологических подложек, помещаемых между электродами и свариваемым материалом. Это, с одной стороны, уменьшает теплоотдачу в электроды, с другой – создает тепловой подпор в период подачи высокочастотной энергии. Кроме того, подложка нивелирует влияние разнотолщинности материала и неравномерности зазора на качество сварного шва. Прочность сварного шва резко изменяется - от 60 до 300 Н, т.е. в 5 раз, при изменении давления от 2,0 до 60 МПа. Дальнейшее увеличение давления незначительно повышает прочность сварного шва, а затем при увеличении давления с 8,0 до 18 МПа прочность сварного шва падает с 0,32 до 0,30 кН.

Наряду со сваркой тканей из синтетических волокон можно осуществлять сварку льняной парусины с ПВХ-покрытием, которая может найти широкое применение в различных отраслях народного хозяйства. Высокочастотная сварка таких тканей обладает значительными преимуществами по сравнению с изготовлением изделий из этих материалов на швейных машинах. Высокая прочность сварного шва возможна при довольно широком варьировании параметров процесса сварки, что обеспечивает стабильность процесса. Рекомендуемый режим сварки: напряжение на рабочих электродах 200...300 В, напряженность поля $(1,3...2,0) \times 10^5$ В/м, давление $(3,5...5,5) \times 10^5$ Н/м², время сварки 5...10 с, время охлаждения материала под давлением 5...10 с.

Особенностью высокочастотного оборудования для сварки тканевых материалов является наличие в нем пресса, позволяющего получить высокое удельное давление на единицу сварного шва – до 70×10^5 Н/м², имеющего более жесткие плиты и высокую их параллельность.

При определении необходимой колебательной мощности генератора следует учитывать, что термический КПД при сварке тонких тканевых материалов значительно ниже, чем при сварке ПВХ-пленок, а температура плавления ткани, изготовленной из 100-процентных капроновых волокон, лежит на уровне 260 °С, что значительно превышает температуру плавления (165 °С) ПВХ-пленки.

Высокочастотный способ сварки тканевых материалов, наряду с ультразвуком, начинает утверждаться в швейной промышленности. Дальнейшее развитие работ по высокочастотной сварке в швейной промышленности может идти в направлениях изготовления аппликаций и этикеток, нанесения декоративных швов, например, при приварке карманов, стежки тепловой одежды, одеял и т.д.

При разработке технологических процессов и оборудования особое внимание должно быть обращено на создание технологической оснастки, от которой во многом зависит и качество сварки, и производительность установки.

Контрольные вопросы

1. Опишите принцип действия ударной сварки в вакууме.
2. Укажите принцип индукционной сварки.
3. В чём заключается «принцип близости»?
4. Какие существуют группы процессов высокочастотной сварки?

ГЛАВА 4 СВАРКА В ТВЁРДОМ СОСТОЯНИИ

4.1 УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА

Ультразвуковая сварка (УЗС) – процесс соединения в твердом состоянии однородных и разнородных металлов, полимеров и даже биологических тканей за счет возбуждения в свариваемых деталях высокочастотных механических колебаний с частотой свыше 18 кГц, с приложением определенного давления. Ультразвуковые механические колебания возбуждаются в магнитострикционном преобразователе и с помощью волновода, служащего для увеличения амплитуды колебаний, и сварочного инструмента передаются свариваемым деталям, [1, 2].

При УЗС энергия вибрации при механических колебаниях ультразвукового преобразователя создает **сложные напряжения сжатия и среза**. Когда возникающие напряжения начинают превышать предел упругости соединяемых материалов, происходит пластическая деформация в зоне их соприкосновения. В результате пластической деформации и диспергирующего действия ультразвука происходит удаление адсорбированных пленок жидкости, газов, органических пленок и поверхностных оксидов, поверхности деталей зачищаются, и возникает физический контакт двух соединяемых материалов. В процессе деформирования происходит увеличение площади контакта, что обеспечивает получение реальной прочности соединения.

При УЗС температура нагрева даже непосредственно в зоне контакта не превышает 30...50 % от температуры плавления соединяемых материалов, что позволяет использовать этот метод для соединения чувствительных к нагреву материалов.

Недостатки УЗС: один из соединяемых материалов должен быть достаточно пластичным; верхний предел толщины одной из присоединяемых деталей ограничен 1...3 мм из-за малой мощности ультразвуковых преобразователей.

Все виды сварочного УЗ оборудования содержат **УЗ колебательную систему**, построенную по типовой структуре: источник упругих колебаний (преобразователь), волновод продольных (либо крутильных) колебаний, концентратор, инструмент, акустическая развязка для крепления. Вход колебательной системы – преобразователь, возбуждаемый генератором высокой частоты. Выход колебательной системы – инструмент, который возбуждает УЗ колебания в свариваемых деталях.

Существуют **три основных вида применяемых для микросварки колебательных систем**, каждая из которых генерирует УЗ колебания: продольные, поперечные (изгибные), крутильные.

Простейшей колебательной системой является **система с продольными колебаниями** (рис. 4.1). Недостатком ее является некоторая неустойчивость работы при создании больших усилий, необходимых при УЗС толщин материалов, начиная с 0,5 мм.

Сварочные процессы и оборудование

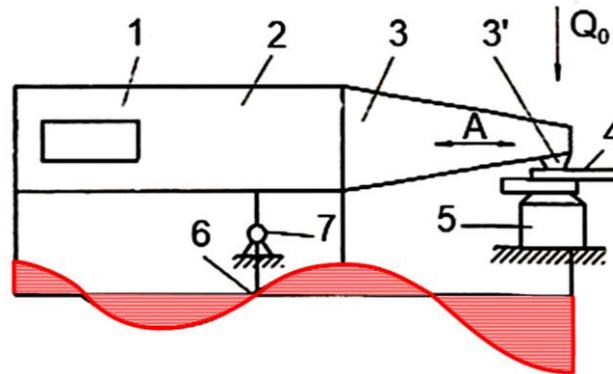


Рис. 4.1. УЗ колебательная система с боковым сварочным выступом на концентраторе упругих колебаний: 1 – преобразователь (двигатель); 2 – волновод; 3, 3' – концентратор продольных колебаний; 4 – свариваемые детали; 5 – УЗ опора-отражатель; 6 – эпюра смещений (амплитуд) вдоль колебательной; 7 – акустическая развязка; Q_0 – сжимающее сварочное усилие

При больших усилиях сжатия в концентраторе могут возникать *изгибные волны* и связанные с ними вертикальные колебания в зоне сварки, способствующие повышению деформации сварного соединения. Сварочные машины, колебательные системы которых выполнены по этой схеме, используются для получения точечных, точечно – шовных, кольцевых и замкнутых соединений при сварке элементов приборов.

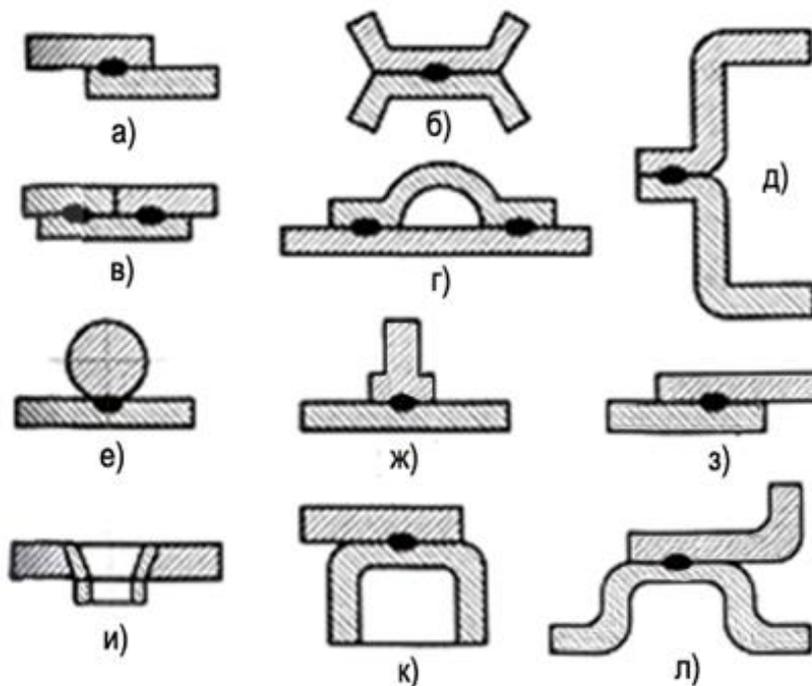


Рис. 4.2. Соединения, выполненные УЗ сваркой

УЗС выполняют различные виды соединений (рис. 4.2).

Сваркой внахлест можно соединять две (а) или несколько (б) деталей, а также профили (в), фасонные (г) и пустотелые (д) детали. При монтаже радиоэлектронной аппаратуры УЗС применяют, например, для соединения цилиндрических деталей с плоскими (е) и торцового соединения проволочными выводами (ж), когда проволочная заготовка подается в зону сварки через отверстие в инструменте

или опоре и оплавляется в месте сварки. Сварку различных цилиндрических проводников можно выполнять при параллельном (з) или крестообразном взаимном расположении. Пустотелые выводы и контакты соединяют с платами (и), про-

Сварочные процессы и оборудование

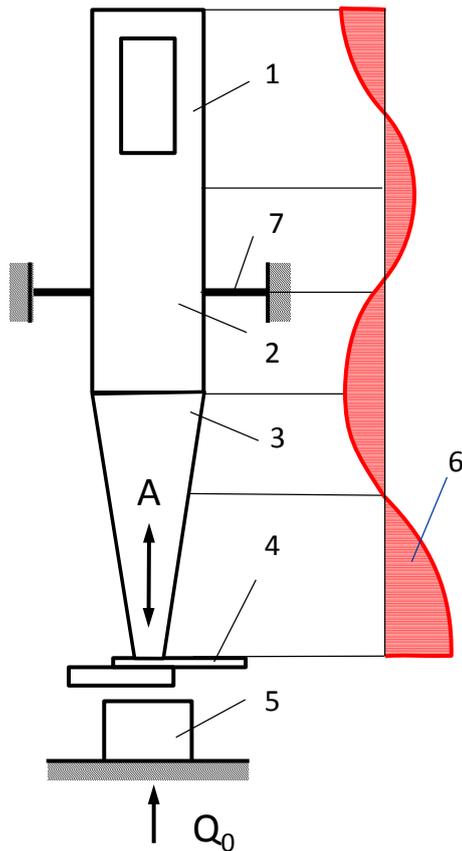


Рис. 4.3. УЗ колебательная система для сварки при повышенных УЗ частотах: 1 – преобразователь (двигатель); 2 – волновод; 3 – концентратор продольных колебаний; 4 – свариваемые детали; 5 – УЗ опора-отражатель; 6 – эпюра смещений (амплитуд) вдоль колебательной; 7 – акустическая развязка; Q_0 – сжимающее сварочное усилие

фильными инструментами и опорами. Применяют УЗ сварку и для соединения монтажных лепестков с колпачками (к, л). УЗ колебания могут вводиться перпендикулярно свариваемым поверхностям (рис. 4.3).

Обычно рабочая частота этих колебательных систем в пределах 18...25 кГц.

В УЗС наиболее широкое применение нашли **колебательные системы с продольно-поперечными колебаниями** на рабочие частоты 44, 66, 88 кГц. По этой схеме инструмент совершает изгибные колебания, возбуждаемые продольными колебаниями концентратора и преобразователя.

Для микросварки колебательная система обычно выполняется по схеме рис. 4.4, где инструмент (8) совершает изгибные колебания. Обозначения аналогичны рисунку 4.1.

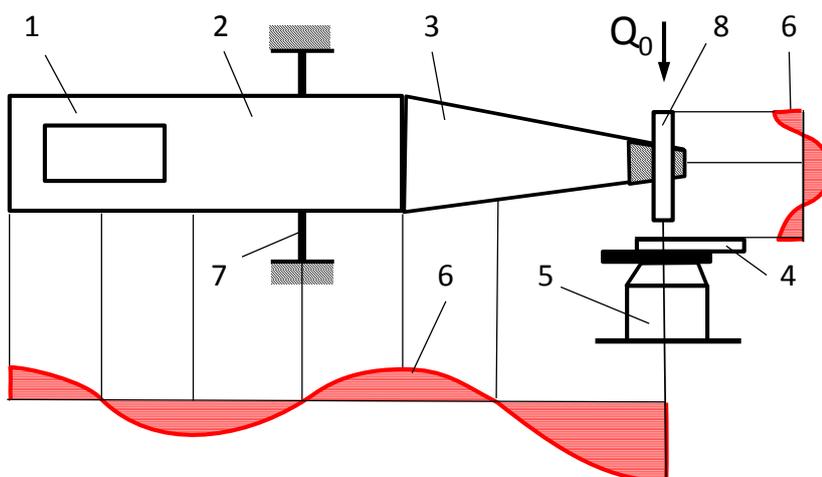


Рис. 4.4. УЗ продольно-поперечная колебательная система для сварки малых толщин, используемая в микросварочных установках

В последнее время в стране и за рубежом проводится разработка **УЗ сварочных машин с крутильными колебательными системами**.

Для получения сплошных соединений может применяться схема, показанная на рис. 4.5, в которой магнитостриктор (1) и волновод (2) приводятся во вращение

с помощью червячной (3) и цилиндрической (4) зубчатых передач. На конце волновода расположен рабочий ролик (5) и холостой (прижимной) ролик (7). Специально для микроэлектроники разработано несколько *способов УЗС*: УЗС крутильными колебаниями, УЗС с косвенным импульсным нагревом, микросварка давлением в сочетании с УЗ колебаниями специальной формы, термокомпрессия с ультразвуком.

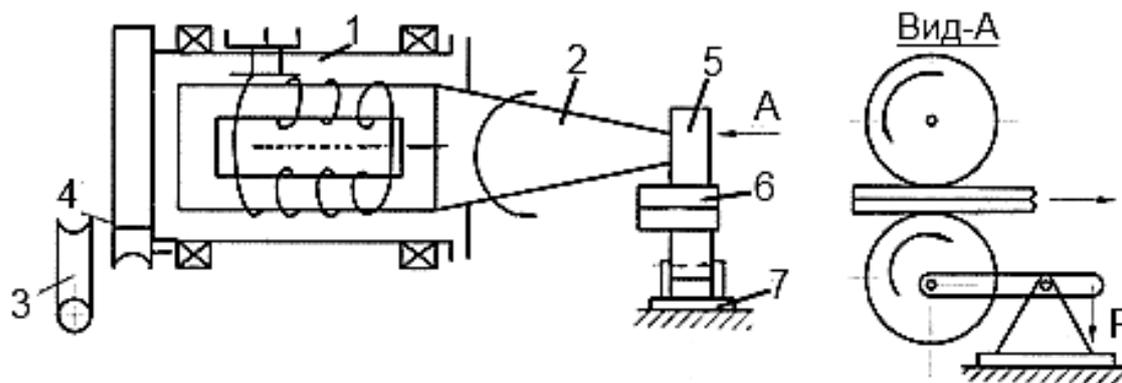


Рис. 4.5. Сварка вращающимся инструментом (шовная сварка)

УЗС крутильными колебаниями (рис. 4.6) дает наилучший эффект при герметизации металлостеклянных корпусов, когда требуется повышенная мощность УЗ. Крутильные колебания в зоне сварки создаются или путем использования нескольких синхронно работающих преобразователей и волноводов, прикрепленных к одному сварочному инструменту, или путем специального разрезного волновода, плечи которого имеют различную длину и работают таким образом, что создают крутильные колебания в рабочем стержне.

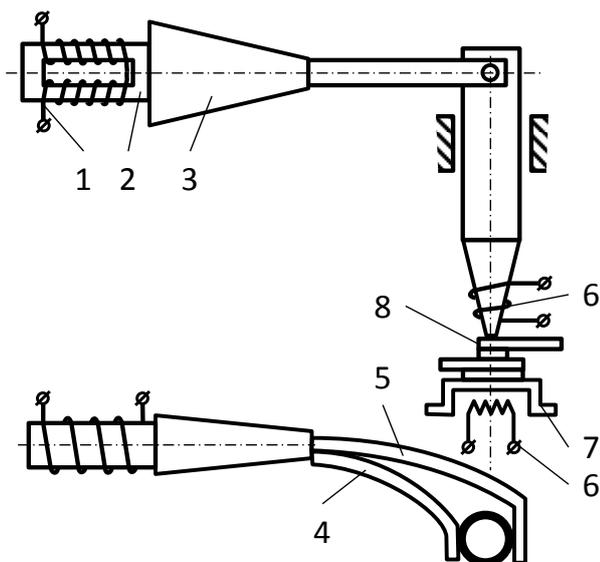


Рис. 4.6. Схема установки с УЗ крутильными колебаниями: 1 – обмотка возбуждения; 2 – магнитоустриктор; 3 – концентратор; 4, 5 – волноводы; 6 – электрический нагрев; 7 – подставка; 8 – изделие

Для повышения качества сварных соединений при УЗС микродеталей разработан новый способ *УЗ сварки с косвенным импульсным нагревом деталей* за счет теплопередачи от сварочного инструмента, нагреваемого проходящим током.

Сущность способа УЗС с косвенным импульсным нагревом состоит в том, что свариваемые элементы подвергаются воздействию УЗ колебаний и нагрева одновременно или в определенной последовательности. Схема устройства для сварки данным способом приведена на рис. 4.7.

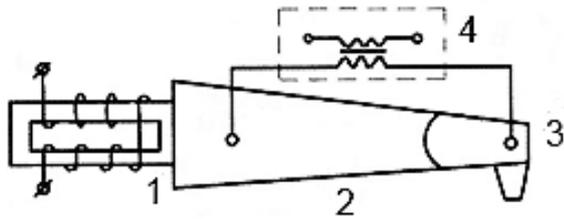


Рис. 4.7. Схема устройства для УЗ сварки с косвенным импульсным нагревом: 1 – магнитострикционный преобразователь; 2 – волновод; 3 – сварочный инструмент; 4 – трансформатор

Процесс УЗС с косвенным импульсным нагревом осуществляется следующим способом. Сначала сварочный инструмент с небольшим усилием прижимается к свариваемым деталям. Затем, через инструмент пропускается импульс тока, производящий нагрев инструмента, и одновременно (или с некоторым опережением или запаздыванием) подаются УЗ колебания, создаваемые в инструменте. Нагрев и воздействие ультразвука могут длиться доли секунды. Величина энергии каждого импульса и их длительность могут регулироваться отдельно и в весьма широких пределах, что позволяет сваривать материалы с различными физико-химическими свойствами.

УЗС с косвенным импульсным нагревом применительно к монтажу микросхем имеет следующие **преимущества**: совместное воздействие ультразвука и нагрева позволяет значительно снизить необходимую температуру нагрева при сварке; максимальная прочность соединения проводников с пленками обеспечивается при меньшей деформации проводника; позволяет соединять трудно свариваемые сочетания материалов при небольшом нагреве и деформации.

Для получения качественных соединений большое значение имеют форма и размер рабочей части инструмента. Распространенной конструкцией УЗ сварочного инструмента (сварочной иглы) является стержень с конической частью. Коническая часть иглы, с помощью которой осуществляется контактирование с проволокой и передача давления на свариваемые элементы, имеет заданные радиусы закругления (рис. 4.8).

Размеры рабочего торца выбираются в зависимости от диаметра привариваемого проводника. Диаметр торца d (или размер a) обычно составляет $3...4$ диаметра привариваемого проводника $d_{пр}$. Это необходимо для уменьшения влияния неточности размещения проводника под инструментом (во избежание выскальзывания проводника).

Длина деформируемого участка проводника при сварке, определяется размером b , который выбирается равной $2...3 d_{пр}$. Увеличение длины b до $4 d_{пр}$ способствует повышению прочности сварного соединения, однако, это не всегда удается сделать из-за малых размеров контактных площадок микросхем.

Повышению прочности соединения также способствует небольшой паз в центре рабочей части вдоль привариваемой проволоки (рис. 4.8, б). Этот паз ограничивает деформацию проводника, повышает эффективность передачи энергии в зону сварки. Однако необходимость тщательной центровки проволоки относительно паза (канавки) и нестабильность обрыва проволоки после второй сварки несколько сдерживают применение инструмента с продольным пазом.

На рис. 4.8, в показана конструкция рабочей части инструмента со слегка вогнутой поверхностью торца, которая позволяет получить качественные соединения при неплоских контактных площадках или расположенных под углом к торцу инструмента. Эта конструкция может успешно применяться, если корпус прибора или подложка недостаточно устойчивы к ультразвуковым колебаниям. При сварке плоским инструментом происходит смещение проволочного вывода или его деформация.

Рабочая поверхность инструмента должна обеспечивать эффективную передачу УЗ колебаний, что достигается хорошим сцеплением с привариваемым проводником. С этой целью на рабочей поверхности инструмента делают поперечную канавку (рис. 4.8, з). Во время деформирования проводника материал затекает в эту канавку, обеспечивая хорошее сцепление с инструментом. Недостаток инструмента с поперечной канавкой: уменьшение фактической площади сварного соединения, так как под канавкой обычно соединение не образуется.

В ряде случаев (сравнительно толстые проволочные выводы и большие размеры контактных площадок) целесообразно применять инструменты с продольной и поперечной канавками (рис. 4.8, д). Наиболее эффективно и качественно происходит процесс УЗ сварки при применении инструмента с крестообразным расположением канавок (рис. 4.8, е), особенно при сварке плоских выводов.

Рассмотренные конструкции рабочей части инструмента предполагают ручную или механизированную подачу проводника под рабочую поверхность с помощью отдельного устройства с направляющей дюзой (капилляром).

Наибольшее распространение при УЗ микросварке круглых тонких проводников получил инструмент с боковым капиллярным отверстием (рис. 4.9). Отвер-

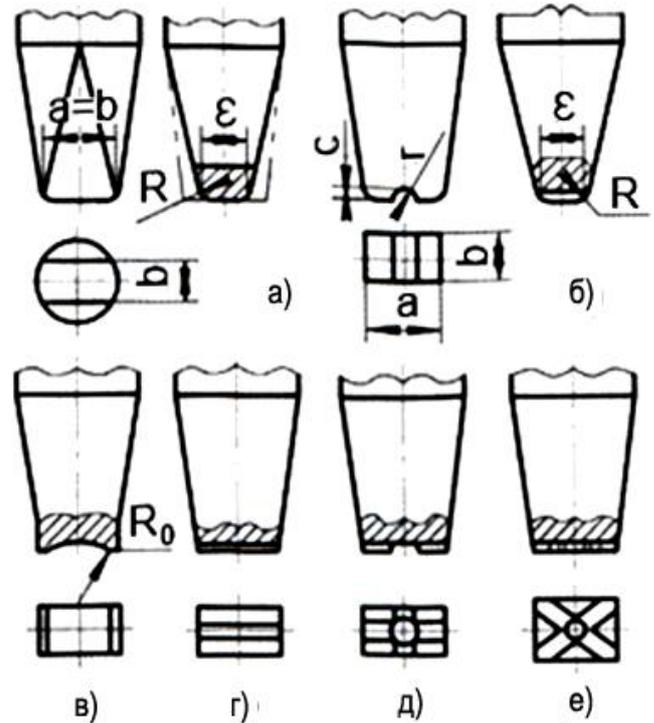


Рис. 4.8. Форма рабочей части инструмента для УЗС проволочных выводов

ствие служит для подачи привариваемой проволоки под рабочую часть инструмента. Обычно диаметр отверстия составляет 1,5...2 диаметра проволоки.

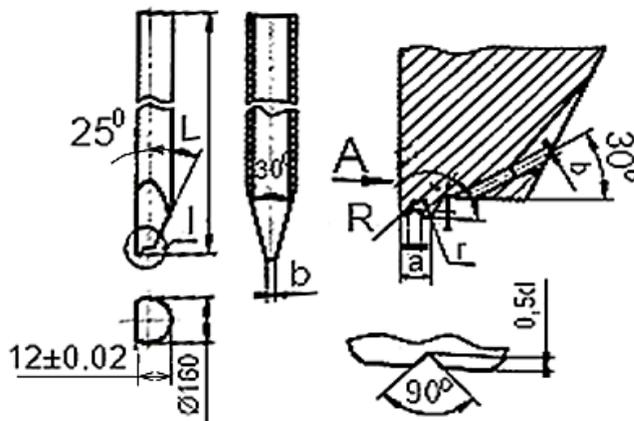


Рис. 4.9. Инструмент для УЗ микросварки с боковым отверстием для подачи проволоки, вид А – второй вариант

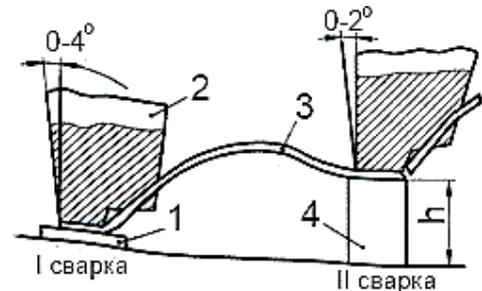


Рис. 4.10. Схема создания проволоочной перемычки с изменением угла наклона инструмента: 1 – контактная площадка; 2 – инструмент; 3 – перемычка; 4 – вывод корпуса

Расположение отверстия должно быть таким, чтобы проволока, с одной стороны, свободно проскальзывала под рабочей частью, когда ее подают вперед, а с другой – не изгибаясь на острой кромке выходного отверстия при перемещении инструмента назад при создании проволоочной перемычки. Такая форма инструмента позволяет легко автоматизировать подачу и отрыв проволоки и исключить влияние оператора на точность совмещения проволоки с торцом инструмента.

Правильный выбор профиля рабочей части во многом определяет надежность обрыва проволоки после создания перемычки. Большой радиус закругления режущей кромки ($r > 15$) затрудняет отрыв проволоки, увеличивает длину деформированного участка проводника. Острая кромка ($r < 5$ мкм) создает концентрацию напряжения в месте перехода от деформированного участка к недеформированному.

Этого противоречия обычно избегают, применяя соответствующий наклон инструмента на 2...4° вперед при сварке первой точки, уменьшающий внедрение инструмента в районе режущей кромки.

При сварке второго конца перемычки инструмент располагают перпендикулярно (или наклоняют на 1...2° в обратную стороны (рис. 4.9)), что обеспечивает прочное соединение и возможность легкого и четкого обрыва проволоки. Наиболее важно это при сварке алюминиевой проволоки, чувствительной к концентраторам напряжений.

Для УЗ сварки также широко применяются инструменты с центральным капиллярным отверстием (рис. 4.10, а) для сварки встык с образованием шарика и внахлест.

Диаметр капиллярного отверстия d_0 имеет допуск $\pm 3...5$ мкм, что обеспечивает свободное прохождение привариваемой проволоки и удержание шарика на контактирующей части инструмента. Контактующая площадка b относительно оси отверстия может располагаться концентрично с отклонением не более ± 5 мкм.

Такой жесткий допуск обусловлен тем, что контактирующий торец инструмента должен работать в любом направлении, а при разнотолщинности стенок длина сварных точек меняется, а, следовательно, меняется и прочность соединения.

Ответственным элементом в инструменте является внутренний радиус, который обрабатывается по десятому классу чистоты. Малейшие шероховатости кромки и другие дефекты приводят к нарушению целостности проволоки. Сопряжение конической заходной части отверстия с цилиндрическим рабочим отверстием также должно быть плавным.

На рис. 4.11, б показан инструмент для групповых УЗ сварки, применяемый при соединении контактной рамки с кристаллом при «паучковой» технологии монтажа.

Обычно инструмент имеет плоскую рабочую площадку, подвергаемую обработке (алмазной или электроэрозионной) для придания шероховатости с целью увеличения сцепления инструмента с выводами рамки.

В качестве инструмента для УЗС пластмасс применяют резонансные ролики, сварочные стержни-наконечники цилиндрической формы и клинообразной заточки, а также специальные концентраторы-инструменты (рис. 4.11).

Ножевой концентрированный волновод (рис. 4.11, а) имеет экспоненциальную или ступенчатую ферму сечения. Он применен для УЗС пластмассовых изделий с длиной шин до 40 мм без перестановки заготовок или инструмента, а также для шовно-шаговой сварки.

Тарельчатый концентратор-инструмент (рис. 4.11, б) имеет рабочий поясok и сложную форму сечения. Его применяют для УЗС полиэтиленовых банок с пищевыми продуктами. Сварка производится сразу по всему контуру соединяемых деталей. Диаметр рабочей части такого инструмента может достигать до 120 мм при условии соответствующего расчета их профиля.

Ступенчатые ножевые концентраторы-инструменты (рис. 4.11, в) применяют для УЗС длиной до 350 мм за один переход.

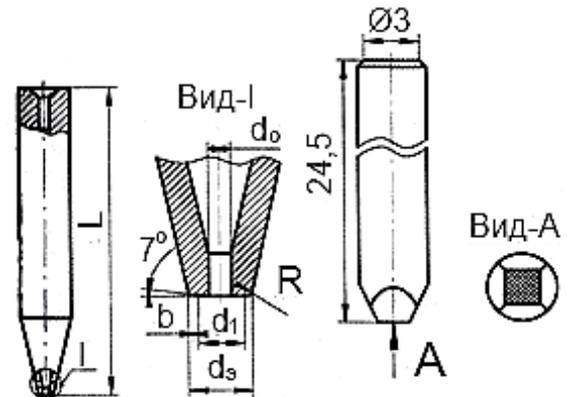


Рис. 4.11. Инструмент для УЗ микросварки с центральным капиллярным отверстием и инструмент для групповой приварки выводов методом паучковой технологии

Контрольные вопросы

1. Опишите принцип ультразвуковой сварки (УЗС).
2. Какие виды колебательных систем применяют при ультразвуковой сварке (УЗС)?
3. Что является важным для получения для получения качественных соединений?
4. Каким образом выполняют УЗС пластмасс?

4.2 СВАРКА ТРЕНИЕМ (СТ)

Соединением при сварке трением образуется в процессе совместного пластического деформирования свариваемых деталей под действием сил контактного трения, величина которых зависит от скорости вращения и сжимающего осевого усилия. Основными параметрами при сварке трением являются: скорость относительного вращения поверхностей трения, осевое усилие сжатия деталей, величина осадки и длительность сварки, [1].

По характеру силового воздействия, степени локализации пластической деформации в приконтактном объеме и совокупности факторов, определяющих генерирование теплоты в зоне соединения, сварка трением аналогична ультразвуковой сварке. Главным вопросом при сварке трением является анализ процессов преобразования механической энергии в тепловую, так как тепловые процессы на соединяемых поверхностях определяют в основном качество соединения. Простейшая и наиболее распространенная схема процесса сварки трением приведена на рис. 4.12.

Две детали устанавливаются соответственно в зажимах машины. Одна из них неподвижна, другая – приводится во вращение вокруг их общей оси. На сопряженных торцах деталей, прижатых друг к другу осевым усилием F , возникают силы (момент) трения. Работа, затрачиваемая на их преодоление, при относительном вращении свариваемых заготовок преобразуется в теплоту, которая: выделяется на поверхностях трения и в приповерхностных слоях металла, нагревая их до температур, необходимых для образования сварного соединения (при сварке, например, черных металлов, температура в стыке достигает 1273... 1573 К).

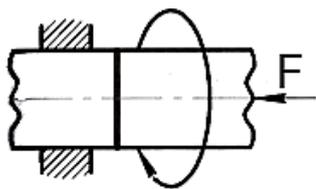


Рис. 4.12. Простейшая (конвенционная) схема процесса сварки трением

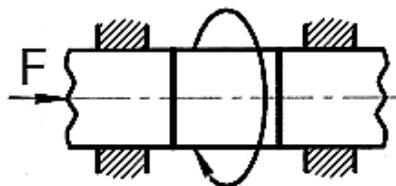


Рис. 4.13. Сварка трением двух не вращающихся деталей с помощью вращения зажатой между ними

Металл, ставший пластичным в процессе трения, выдавливается из стыка в радиальных направлениях под действием осевого усилия. Происходит осадка – сближение деталей. Выдавленный металл (грат) имеет форму правильного сдвоенного кольца, симметрично располагающегося по обе стороны плоскости стыка.

Вслед за обычной (конвенционной) сваркой трением были предложены некоторые ее разновидности, в значительной мере позволяющие преодолеть названные недостатки (рис. 4.13).

Сварка двух не вращающихся деталей посредством зажатого между ними вращающегося третьего тела осуществляется согласно рис. 4.14.

Сварочные процессы и оборудование

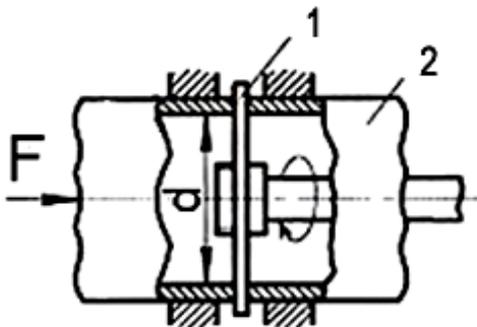


Рис. 4.14. Сварка неподвижных труб с помощью зажатого между ними относительно тонкого диска

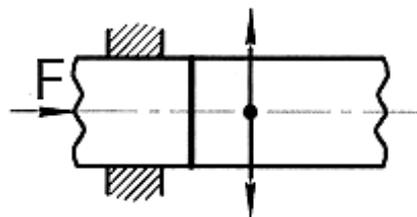


Рис. 4.15. Вибрационная сварка трением

Основными ее преимуществами являются обеспечение соединения массивных (длинных) деталей.

Схема сварки длинных труб с помощью вращения зажатого между ними относительно тонкого диска (рис. 4.15) представляет собой разновидность предыдущей схемы процесса.

Диск срезается по диаметру, близкому внутреннему диаметру (d) свариваемых труб (2), а его периферийная часть в виде шайбы остается вваренной между торцами труб.

Схема *вибрационной сварки трением* представлена на рисунке 4.15. Колебательные движения в плоскости трения одной из свариваемых деталей относительно другой с небольшой амплитудой и частотой порядка нескольких десятков колебаний в секунду. Этот способ применяется при сварке пластмасс.

Трением сваривается большинство термопластов, имеющих стабильную вязкость в широком диапазоне температур: полиамиды, полиметилметакрилаты, полиформальдегиды, полистирол, поликарбонаты и т.д.

Предпочтительнее сварку трением применять для жестких пластмасс с модулем упругости, большим или равным 103 МПа. Этим способом можно также получать качественные соединения на заготовках из разнородных пластмасс, сваривать детали из непластифицированного и пластифицированного ПВХ.

Радиальная сварка представляет собой приварку трением сплошного или разрезного кольца (1) к трубе (2) (или стержню) по цилиндрической поверхности (рис. 4.16). Равномерное по поверхности трения давление обеспечивается синхронной работой системы кулачков (3). Основное ее преимущество состоит в расширении области применения сварки трением для соединения трубных заготовок различных длин и диаметров, в том числе в полевых условиях.

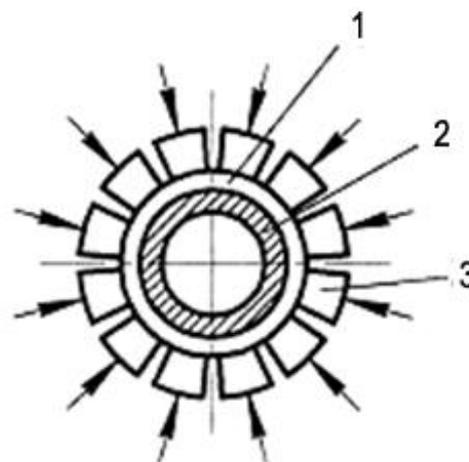


Рис. 4.16. Радиальная сварка

Сварка заготовок некруглого сечения и деталей, не имеющих прямолинейной оси, традиционным методом затруднительна или вовсе невозможна. Это связано со сложностями в осуществлении ориентации вращения совмещения и равномерного нагрева по всей площади торцов таких деталей. Следует также отметить, что в процессе нагрева при обычной методике сварки трением тепловыделение вдоль радиуса торцов свариваемых заготовок неравномерно, толщина зоны термического влияния различна. Этих недостатков можно избежать, используя орбитальное движение. Схема **орбитальной сварки трением** представлена на рис. 4.17, где одна из заготовок неподвижна, в то время как другая совершает круговые движения с орбитальным радиусом (эксцентриситетом) без вращения вокруг собственной оси.

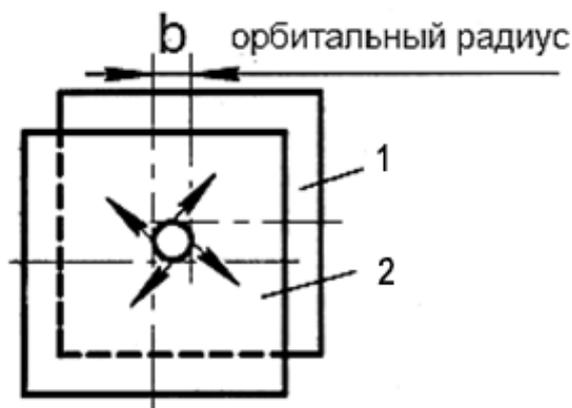


Рис. 4.17. Принципиальная схема орбитальной сварки трением: 1 – неподвижная заготовка; 2 – подвижная заготовка

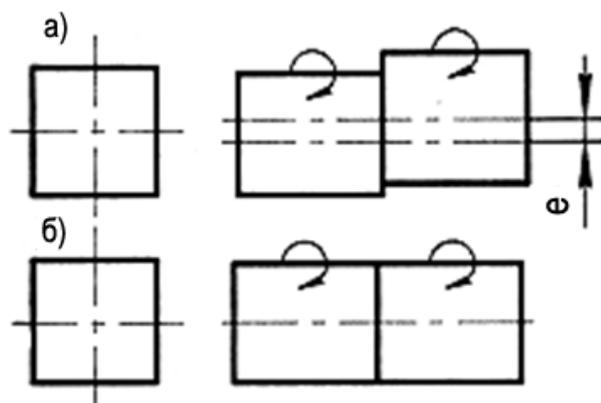


Рис. 4.18. Схема процесса орбитальной сварки: а – период нагрева; б – период проковки

Обе заготовки в процессе орбитального движения прижимаются друг к другу с определенным давлением, и при достижении температуры сварки на соединяемых поверхностях значение орбитального радиуса приводится к нулю. Затем к нагретым и сориентированным свариваемым заготовкам прикладывается давление проковки, в результате чего образуется неразъемное соединение.

Известна **схема процесса орбитальной сварки**, когда обе свариваемые заготовки вращаются вокруг своих осей в одну и ту же сторону и с одинаковой частотой. Если оси заготовок смещены относительно друг друга на величину орбитального радиуса e (рис. 4.18, а), то на сопряженных поверхностях вращающихся заготовок появится относительное движение. Каждая точка на свариваемой поверхности одной заготовки совершает круговые движения относительно контрточки поверхности другой заготовки, а радиус этих окружностей равен величине эксцентриситета e .

При достижении взаимной соосности и ориентации обеих заготовок, когда e становится равным нулю (рис. 4.18, б), относительное движение поверхностей прекращается. Поэтому силы трения появляться не будут, и стадия нагрева закончена. По завершению стадии нагрева торцов осуществляется проковка, в процессе которой образуется сварное соединение.

В 1991 г. Британским институтом сварки был запатентован новый способ сварки трением, позволяющий выполнять стыковые и нахлесточные швы листовых заготовок. Он был назван способом сварки трением с перемешиванием (СТП) для того, чтобы выделить его среди множества других существующих способов сварки трением.

Процесс сварки (рис. 4.19) при этом способе происходит следующим образом. Специальный вращающийся инструмент, состоящий из утолщенной части – заплечика и выступающей части – штыря, в месте стыка вводится в контакт с поверхностью зафиксированных на массивной подкладке соединяемых заготовок таким образом, чтобы штырь внедрился в заготовки, а заплечик коснулся их поверхностей. В результате трения штыря и заплечика о заготовку выделяется теплота, которая доводит металл вокруг инструмента до пластичного состояния. Затем инструменту сообщают поступательное движение со скоростью сварки, и материал заготовок, перемещаясь из зоны нагрева в зону охлаждения, огибает штырь и образует соединение, [5].

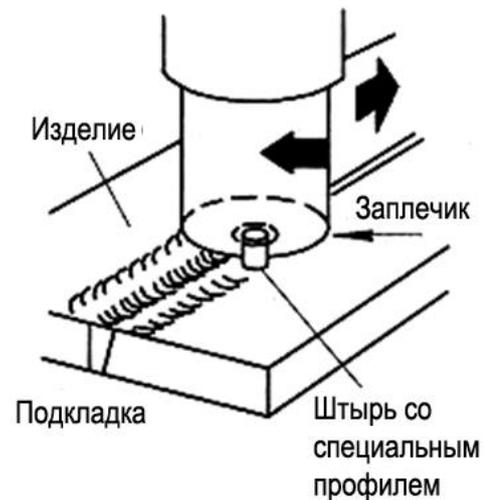


Рис. 4.19. Схема процесса сварки трением с перемешиванием

Основными параметрами процесса СТП являются скорость сварки (скорость перемещения инструмента), частота вращения инструмента, усилие прижатия и усилие перемещения инструмента, угол наклона инструмента, его размеры. Кроме того, учитываются условия трения в зависимости от применяемого материала инструмента и свариваемого материала, а также напряжение течения материала заготовок при температуре деформации.

Сварка трением с перемешиванием применяется для сварки листов из алюминия, меди и их сплавов.

Основные типы соединений, выполненных СТП, показаны на рис. 4.20.

Основными преимуществами СТП **являются следующие:**

- отсутствие в процессе сварки дыма, шума и ультрафиолетового излучения;
- возможность получения беспористых швов на любом алюминиевом сплаве, включая сплавы, чувствительные к пористости (сплавы с магнием, литием и др.);
- отсутствие присадочного металла и защитного газа;
- не требуется придания специального профиля кромкам и удаления оксидной пленки перед сваркой;
- возможность получения соединений во всех пространственных положениях;

Сварочные процессы и оборудование

- процесс сварки идеально подходит для автоматизации; не требуется высокой квалификации оператора;
- благодаря относительной простоте оборудования достигается высокая эффективность использования энергии. Так, для выполнения однопроходной сварки алюминиевого сплава серии 6 000 толщиной 12,5 мм требуется всего 3 кВт энергии;
- сварка может выполняться в сильных магнитных полях, например при соединении шинопроводов.

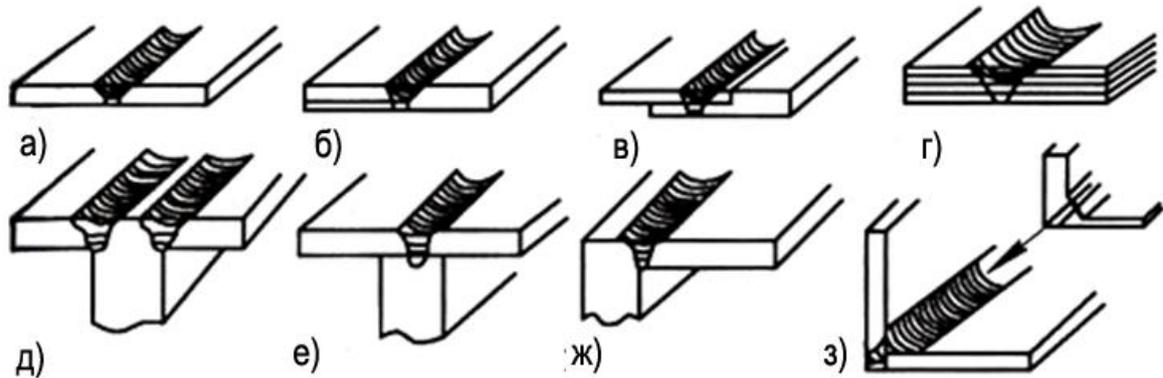


Рис. 4.20. Типы соединений, выполняемых СТП: а – стыковое; б – нахлесточно-стыковое; в – нахлесточное; г – многослойное нахлесточное; д – двухпроходное тавровое; е – тавровое прорезное; ж, з – угловое

Низкий уровень деформаций, высокая воспроизводимость качества швов, полученных СТП, способствует улучшению существующих сварных конструкций из алюминиевых сплавов. При этом обеспечиваются *технологические возможности*, а именно:

- швы могут быть получены на сплавах, которые нельзя выполнить сваркой плавлением из-за чувствительности к образованию горячих трещин;
- может быть достигнут более высокий уровень прочности для термически упрочняемых сплавов;
- формирование шва в твердой фазе позволяет сохранить свойства для метастабильных сплавов, таких, как композиты или сплавы, полученные быстрой кристаллизацией;
- можно получить крупные панели, состоящие из многочисленных небольших профилей, которые практически невозможно или экономически нецелесообразно прессовать или отливать;
- легковесные прессованные панели могут быть соединены между собой без деформаций для получения более крупных конструкций судов, железнодорожных платформ или тяжелых грузовиков;
- для создания полых заготовок можно соединить более простые полуфабрикаты, полученные литьем или штамповкой;

Сварочные процессы и оборудование

- можно получать сварные узлы со стыковыми и нахлесточными швами заготовок, изготавливаемых с помощью различных технологий (литье, прессование и др.);
- сборка стыков не требует очень точной подгонки кромок. Так, для листов толщиной 1,6 мм зазор может быть до 0,2 мм, для плит толщиной 12,7 мм – до 1,25 мм.

Промышленное применение. Сварка трением достаточно широко применяется в машиностроении, ядерной энергетике, инструментальном производстве, электротехнической промышленности, тракторо- и автомобилестроении, а также в авиакосмической технике, химическом и нефтяном машиностроении.

Мировая практика использования сварки трением в промышленности показывает, что этот метод сварки является одним из наиболее интенсивно развивающихся технологических процессов. Зарубежные источники сообщают о перспективах использования процесса сварки трением с перемешиванием в судо-, вагоно-, ракето- и авиастроении, электротехнической и пищевой промышленности.

Контрольные вопросы

1. Опишите процесс образования сварного соединения при сварке трением.
2. В чем состоит принцип радиальной сварки?
3. В чем состоит принцип сварки трением с перемешиванием?
4. Укажите основные параметры режима сварки трением с перемешиванием.

ГЛАВА 5 ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА (ДС) (P, T, A, f, t-ПРОЦЕССЫ)

Качественные соединения металлов (однородных и неоднородных), металлов с неметаллическими материалами (вакуумно-плотной, оптической, магнитной, ферритами, кварцем, ситаллом, сапфиром, пьезокерамиками, органическими материалами (фторопластом) с приложением давления P при нагреве до температуры T в защитной атмосфере A в течение времени t и с применением дополнительных интенсифицирующих параметров (УЗ-колебания, циклическое приложение давления и температуры, сдвиговое воздействие, применение эффекта Ганна, приложение электростатических полей, радиационная обработка, использование эффекта взрывающихся проводников и др.), которые могут быть получены **диффузионной сваркой** со всеми ее многочисленными разновидностями, [1].

Развитие современной науки и техники требует для создания различных конструкций применения металлов, сплавов и неметаллов, обладающих высокими механическими и эксплуатационными свойствами при различных температурах и нагрузках; коррозионной и эрозионной стойкостью в различных средах; физическими свойствами, не изменяющимися при воздействии на них электромагнитных и электрических полей, радиоактивных лучей и т.п. К таким материалам относятся:

- некоторые высокоуглеродистые (конструкционные и теплоустойчивые) стали и чугуны;
- коррозионно-стойкие стали, жаропрочные сплавы;
- цветные металлы (медь, алюминий, магний);
- сверхтвердые сплавы;
- тугоплавкие и активные металлы и их сплавы, керамические материалы (керамика, кварц, стекло, графит, ситаллы, керметы, сапфир и др.).

Многие из этих материалов достаточно дорогостоящие, мало пластичны, нерастворимы друг в друге, имеют высокую температуру плавления. Соединение этих материалов в большинстве случаев связано с определенными трудностями.

Широко применяемые способы сварки плавлением и диффузионно-контактной пайкой не могут преодолеть барьер несовместимости, присущий миру металлов, сплавов и неметаллических материалов, и получить высококачественное соединение многих из них. Эта проблема была решена Н.Ф. Казаковым путём разработки *способа диффузионного соединения материалов в вакууме и газовых средах*.

«**Диффузионная сварка в твердом состоянии** – способ получения монолитного соединения, образовавшегося вследствие возникновения связей на атомном уровне, появившихся в результате максимального сближения контактных поверхностей за счет локальной пластической деформации при повышенной температуре, обеспечивающей взаимную диффузию в поверхностных слоях соединяемых материалов».

Основным преимуществом ДС является ее способность соединять без

применения припоев, флюсов и без ограничения соотношения толщин разнообразные металлические материалы, а также металлы с керамикой, стеклами, керметами и др. Это дает возможность изготавливать узлы различных приборов, а также получать биметаллы, триметаллы и более сложные композиционные материалы. Метод позволяет успешно решить проблему получения сварных соединений по всем характеристикам (прочность, пластичность, термостойкость, электропроводность), идентичных исходным материалам.

ДС позволяет соединять детали и целые узлы с высокой размерной точностью по плоской, конической, сферической и сложной рельефной поверхности. Применение этого способа взамен пайки уменьшает массу узлов и приборов. Все это позволяет при использовании ДС существенно повысить качество, долговечность приборов и устройств в различных отраслях техники.

Сварку проводят в специальных сварочных установках. *Установки для ДС* не сложны по своей конструкции (рис. 5.1). Две части узла помещают в вакуум-

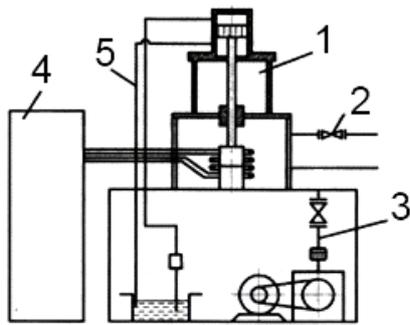


Рис. 5.1. Принципиальная схема установки для диффузионной сварки

ную камеру (1). В процессе сварки камера охлаждается проточной водой (2). Защита стыкующихся поверхностей деталей от интенсивного окисления в процессе разогрева и сварки в рабочей камере обеспечивается разрежением вакуумной системой (3). Источником нагрева свариваемых деталей служит индуктор высокочастотного генератора (4); сжимающее усилие передается от гидросистемы (5). После сварки детали охлаждаются в вакуумной камере до соответствующей температуры.

Уровень развития современных представлений о механизме взаимодействия различных материалов с металлами, анализ влияния пара-

метров процесса ДС на стабильность свойств исходных материалов, анализ конструктивных особенностей сварных узлов и условий их эксплуатации позволяют определять граничные параметры процесса сварки путем предварительного анализа. Это может значительно снизить трудоемкость экспериментальных исследований по подбору режимов ДС соединяемых материалов, обеспечивающих необходимое качество сварного соединения и сохранение специально созданной структуры и свойств материалов.

Основными отличительными особенностями и параметрами процесса являются давление, температура, время выдержки, защитная среда и подготовка поверхностей.

Давление, прикладываемое к свариваемым металлам, обычно не превышает величин предела текучести более пластичного из соединяемых. Это позволяет получать прецизионные соединения, как правило, без дополнительной механической обработки после сварки.

При соединении металлов с неметаллами установлено, что повышение сварочного давления выше некоторого уровня во многих случаях приводит к снижению прочности сварных соединений вследствие возникновения микротрещин в керамическом материале. Величина такого уровня, например, при сварке керамики ВК94-2 с медью, составляет 16-18 МПа.

Для других керамик эта величина может быть иной: при сварке ферритов в зависимости от реального объема деталей и температуры – 8...4 МПа, при сварке муллит-корундовой керамики – > 25 МПа. Давление, обеспечивающее формирование полного контакта, как показано выше, существенно зависит от относительной толщины металлической прокладки в узле. Поэтому, давление при сварке зависит не только от температуры и времени, но и от конструктивных особенностей соединения.

При достаточно малой относительной толщине прослойки и невозможности повышения давления сварки в соединении могут остаться непровары. Непровары характерны особенно при сварке деталей по большой площади. При этом толщина металлической детали остается той же, что и при сварке на меньшей площади контакта, но уменьшение относительной толщины резко снижает деформационную способность металла из-за возрастания степени контактного упрочнения.

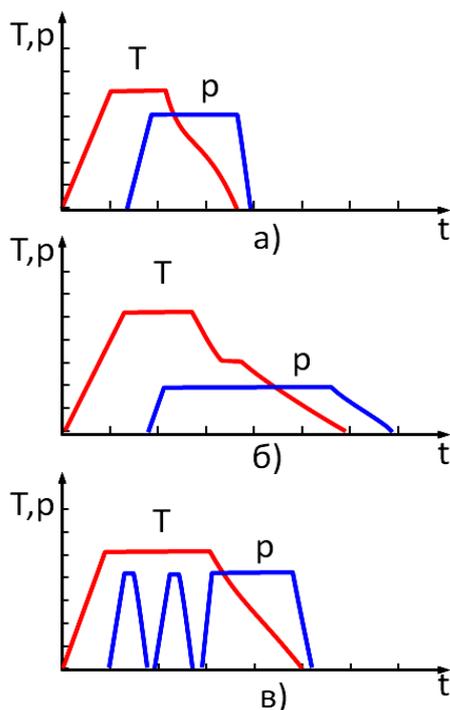


Рис. 5.2. Характер изменения температуры T и давления сварки p в процессе сварки феррит-гранатов с медью (а), феррит-шпинелей (б), ферритометаллических узлов с большой площадью свариваемого контакта (в)

Возможности повышения давления для компенсации этого явления обычно ограничены, поскольку при увеличении объема керамического материала его прочность на сжатие снижается. Это особенно характерно для магнитных керамик.

Поэтому для получения, например, сварных соединений феррит-шпинелей площадью > 550 мм² рекомендуется не традиционный режим ДС, характерный для сварки феррит-гранатов площадью – 100 мм² (рис. 5.2, а), а с более медленным нарастанием и снижением давления и температуры сварки и дополнительным отжигом (рис. 5.2, б). Режим, показанный на рисунке 5.2, в, позволяет получить большую деформацию металлической прослойки при сварке с практически недеформируемой оксидной керамикой и избежать образования непроваров при сварке деталей по большой площади.

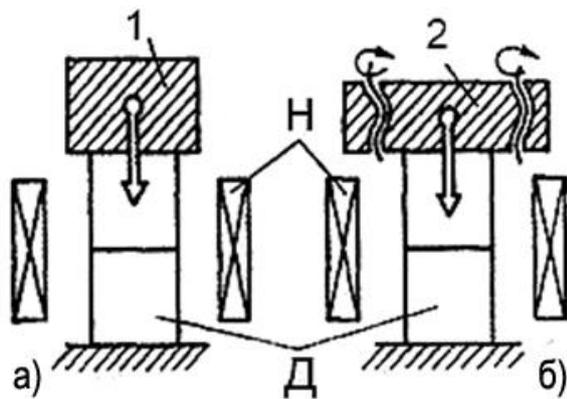


Рис. 5.3. Схема деформирования при диффузионной сварке: *а* – при постоянной нагрузке по величине ниже предела текучести; *б* – с использованием специального устройства, перемещающегося в процессе сварки с контролируемой скоростью; 1 – система нагружения; 2 – система деформирования; Н – нагреватель; Д – детали

В практике диффузионной сварки известно применение *двух технологических схем процесса*, различающихся характером приложения нагрузки или напряжения, действующих в течение цикла. В одной из них используют постоянную нагрузку по величине ниже предела текучести (рис. 5.3, а). При этом процессы, развивающиеся в свариваемых материалах, аналогичны ползучести. Такую технологию называют **ДС по схеме свободного деформирования (ДССД-процесс)**. На практике подобная схема осуществима наиболее просто, поэтому очень широко распространена. По другой схеме, нагрузка и пластическая деформация обеспечиваются специальным устройством, перемещающимся в процессе сварки с контролируемой скоростью (рис. 5.3, б). Эту технологию

называют **ДС по схеме принудительного деформирования (ДСПД-процесс)**. Этот процесс осуществляют при напряжениях, как правило, превышающих предел текучести. В этом случае, скорость деформации ϵ задается приложенной нагрузкой P и условиями, в которых она действует, прежде всего температурой T и временем действия t .

Наиболее часто для создания сварочного давления используются гидравлические системы. Они обладают рядом важных достоинств: компактностью силовых цилиндров; широким диапазоном регулирования давлений рабочей жидкости; возможностью автоматического и дистанционного управления контрольно-регулирующей аппаратурой; позволяют получать нагрузки до сотен и тысяч тонн; обеспечивают постоянство нагрузок в течение всего времени сварочного цикла.

Известны также *два вида пневматических систем давления*, применяемых в установках ДС: системы с использованием силовых пневмоцилиндров; системы с односторонним и всесторонним аэродинамическим сжатием свариваемых изделий.

Системы с использованием силовых цилиндров имеют ряд преимуществ перед гидравлическими, механическими и другими системами давления. Основные достоинства их заключаются в следующем: простота конструкции пневмоцилиндров; простота схемы подвода сжатого воздуха; наличие централизованной заводской подачи сжатого воздуха, позволяющей производить питание большого числа установок; простота обслуживания и ремонта; высокая надежность.

На рис. 5.4 показана принципиальная пневмосхема установки.

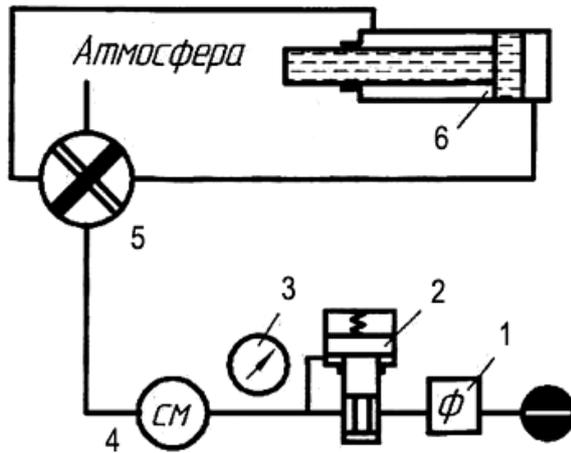


Рис. 5.4. Принципиальная схема пневмосистемы установки

частей системы. Кран управления (5) в положении, указанном на рис. 5.4, соединяет правую полость цилиндра с магистралью сжатого воздуха, а левую полость – с атмосферой. Пневматическая схема установки намного проще гидравлической. Поэтому для сварки мелких деталей в установках рациональнее использовать пневматические системы давления.

Недостатки систем этого типа заключаются в сложности получения больших усилий при сохранении небольших габаритов пневмоцилиндров из-за низкого давления воздуха (5...6 атм) в централизованных магистралях.

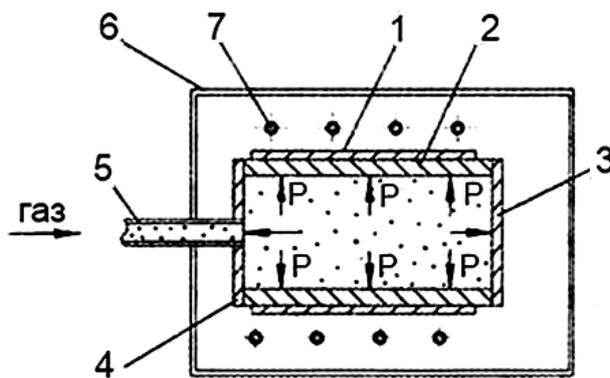


Рис. 5.5. Принципиальная схема системы с односторонним аэродинамическим сжатием свариваемых деталей: 1, 2 – свариваемые детали; 3, 4 заглушки; 5 – трубопровод; 6 – вакуумная камера; 7 – нагреватель

ленной в вакуумной камере (6).

Концы детали (2) закрыты заглушками (3, 4). При нагреве свариваемых деталей (1, 2) индуктором (7), деталь (2) под действием давления газа деформируется.

Установка состоит из фильтра (1) для очистки сжатого воздуха, регулятора давления (2), манометра (3), маслораспылителя (4), крана управления (5), пневмоцилиндра (6) и системы трубопроводов.

Воздух, поступающий из цеховой магистрали, очищается фильтром (1) и попадает в регулятор давления (2). Обычно регуляторы давления позволяют плавно изменять давление воздуха от 1 до 6 атм. Из регулятора давления воздух поступает в маслораспылитель, где захватывает частицы масла для смазки движущихся

Несмотря на большие возможности, такие системы находят ограниченное применение в установках ДС.

Системы с односторонним аэродинамическим сжатием свариваемых деталей применимы только для определенной номенклатуры свариваемых изделий, таких, как биметаллические трубы, многослойные обечайки и т.п.

На рис. 5.5 показана принципиальная схема системы с односторонним аэродинамическим сжатием. Газ (чаще всего аргон) из баллона по трубопроводу (5) подается во внутреннюю полость детали (2), установленной в вакуумной камере (6).

ся и плотно прижимается к детали (1). Возникающие в контакте усилия сжатия оказываются достаточными для осуществления диффузионного соединения.

Системы со всесторонним аэродинамическим сжатием применимы для соединения биметаллических труб. В этих системах заглушается только межтрубное пространство, в котором создается вакуум, а газ под давлением закачивают не только во внутреннюю полость трубы, но и во весь рабочий объем камеры.

Системы с аэродинамическим сжатием позволяют создать давление по цилиндрическим и криволинейным поверхностям. При этом габариты свариваемых изделий ограничиваются только рабочим объемом камер и мощностью источников нагрева. Основными недостатками этих систем являются необходимость установки заглушек и ограничения, связанные с толщинами свариваемых деталей.

Перспективно использование систем давления, принцип действия которых основан на перепаде давлений между разрежением в вакуумной камере и давлением атмосферы.

По этому принципу созданы установки типа 40СП 306М. Механизм приложения сварочного давления (рис. 5.6) выполнен в виде автономного узла и имеет принципиальное отличие от ранее применявшихся конструкций, так как создает сварочное давление за счет атмосферного воздуха. Конструктивно он представляет собой вакуумную камеру, в которой по кольцу расположены девять пневмоцилиндров. Верхние концы штоков пневмоцилиндров соединены с кольцом, на которое опираются три рычага, расположенные под углом 120° . Другие концы рычагов опираются на подвижный шток.

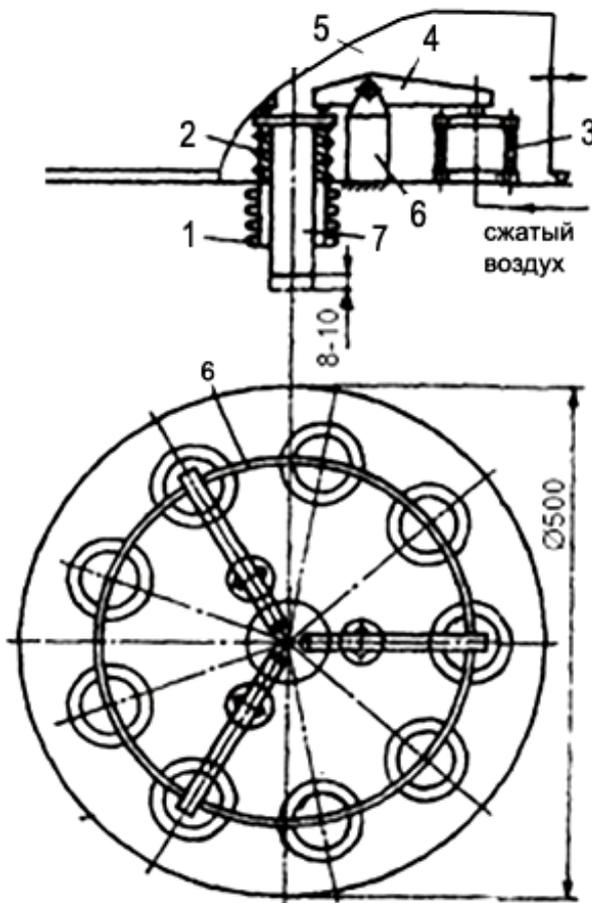


Рис. 5.6. Конструкция вакуумно-пневматического механизма давления: 1 – сильфон; 2 – пружина; 3 – пневмоцилиндр; 4 – силовой рычаг; 5 – камера; 6 – кольцо; 7 – шток; 8 – опора

создавать плавное изменение сварочного давления в трех диапазонах: $0 \dots 1000$ Н, $0 \dots 12500$ Н и $0 \dots 25000$ Н.

Первый диапазон создается путем напуска через натекаТЕЛЬ атмосферного воздуха в камеру механизма. На втором и третьем диапазонах работают пневмоцилиндры путем подачи в них сжатого воздуха. Контроль давления осуществля-

ется по мановакуумметру, сигнал которого подается на регистрационный прибор, усилительное и программное устройство.

Пневмогидравлическая система (рис. 5.7) состоит из пневматического цилиндра (1) с поршнем (2) и гидравлического цилиндра (3) с поршнем-плунжером (4). Перемещаясь под давлением сжатого воздуха, поршень (2) сообщает движение связанному с ним плунжеру (4), который вытесняет масло из цилиндра (3) и

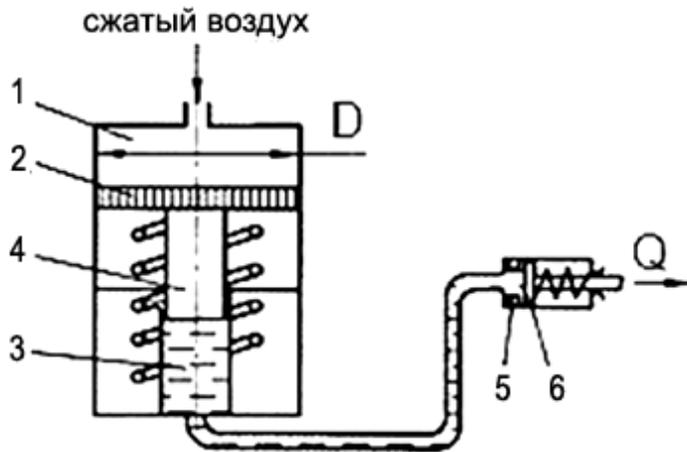


Рис. 5.7. Принципиальная схема пневмогидравлической системы: 1 – пневмоцилиндр; 2 – поршень; 3 – цилиндр; 4 – плунжер; 5 – Исполнительный цилиндр; 6 – поршень

подает его под давлением в исполнительный цилиндр (5) с поршнем (6). По окончании цикла поршни (2) и (6) возвращаются в исходное положение пружинами. Пневмогидравлические усилители могут быть одностороннего и двухстороннего действия. При больших диаметрах поршня пневматического цилиндра для возврата его в исходное положение требуется мощная пружина, для размещения которой приходится увеличивать размеры усилителя. Учитывая это, пневмогидравлические усилители, рассчитанные

на большое давление масла, делают с пневматическим цилиндром двухстороннего действия. В усилителях обычно применяется веретенное или касторовое масло, разбавленное спиртом.

Отличительной особенностью механических систем давления является простота и надежность конструкции. Они используются главным образом в лабораторных и полупромышленных установках для получения небольших усилий.

В основном применяют три вида механических систем:

- 1) рычажные;
- 2) реечные;
- 3) винтовые.

Схемы реечных и винтовых систем давления общеизвестны и не требуют детального рассмотрения.

Механические рычажные системы обычно состоят из рычага, вращающегося на оси шарнира, штока, связанного с рычагом, и тяги с грузами. Величину нагрузки в таких системах можно регулировать изменением массы грузов и соотношения плеч рычага.

Механические системы, как правило, не позволяют получать большие по величине усилия, так как с ростом усилия значительно увеличиваются габариты и стоимость систем.

Гидромеханические системы в установках диффузионной сварки применяются для расширения диапазона нагрузок. В гидравлических системах силовые

цилиндры, рассчитанные, например, на 50000 кг, практически нельзя использовать для нагрузок в 50...200 кг, т.е. в этих системах диапазон регулирования нагрузок ограничен.

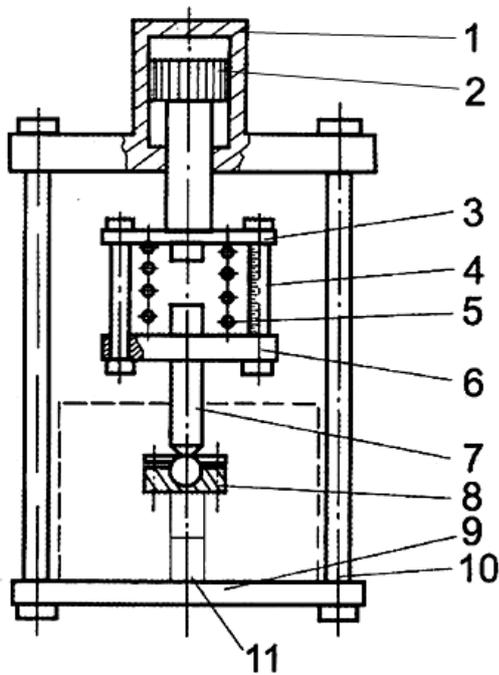


Рис. 5.8. Схема гидромеханической системы давления

На рис. 5.8 показана схема гидромеханической системы, состоящей из гидроцилиндра (1), штока (2), шайбы (3), направляющих шпилек (4), тарированной пружины (5), гайки (6), штока (7), сферической опоры (8), траверсы (9) и стоек (10).

При нагнетании масла в цилиндр (1) шток (2) перемещается вниз. На штоке (2) закреплена шайба (3), которая при движении штока давит на тарированную пружину (5). Нагрузка от пружины (5) через промежуточный шток (7) и сферическую опору (8) передается на свариваемые детали (11).

По мере сжатия пружины (5) нагрузка на свариваемые детали плавно возрастает и определяется по шкале, нанесенной на направляющей шпильке (4). Минимальный диапазон нагрузок, развиваемых этой системой, зависит от упругих свойств пружины и может составлять от 5 до 1 000 кг. При сварке крупных деталей пружина (5)

сжимается до тех пор, пока шток (2) не станет соприкасаться с торцевой поверхностью гайки (6). В этом случае диапазон нагрузок, прикладываемых к свариваемым деталям, определяется только возможностями гидросистемы. Перекосы промежуточного штока (7) и неточности изготовления вакуумной камеры компенсируются сферической опорой (8).

Эти системы позволяют производить сварку как мелких, так и крупных изделий. В последнее время в отечественной промышленности необходимость применения дорогостоящего специального оборудования становится трудно преодолимым препятствием для внедрения в производство ДС. Но данное препятствие можно обойти за счет применения ДС с термическими системами давления.

Основным преимуществом установок с термическими системами давления (ТСД) является то, что они представляют собой обычные электронагревательные вакуумные печи или печи с защитно-восстановительной средой. Внедрение данного технологического процесса в производство не приводит к дополнительным затратам на переоборудование существующих производственных линий.

Принцип действия ТСД основан на феномене температурной деформации материалов, способном привести при изменении температуры к возникновению механических напряжений в сопряженных деталях с различными температурными коэффициентами линейного расширения (ТКЛР). При создании давления во

время нагрева ТКЛР охватываемой детали должен быть больше, чем у охватывающей. Возникающее при этом давление прижима деталей друг к другу оказывается вполне достаточным для осуществления процесса диффузионного соединения данных деталей. Охватывающей (охватываемой) деталью может быть не только какой-то элемент свариваемого изделия, но и различные термокомпрессионные устройства (технологические приспособления оснастки), стягивающие (распирающие) элементы которых изготовлены из материала с ТКЛР меньшим (большим), чем у охватываемых (охватывающих) деталей. При соответствующем подборе материалов деталей устройств, а также зазоров в соединении можно получить практически любую величину усилия прижима, необходимого для качественного соединения заготовок.

Важными достоинствами этих устройств являются простота конструкции и низкая стоимость, а также возможность создания равномерного давления при сварке по криволинейным и цилиндрическим поверхностям для деталей любой толщины и габаритов. Конструкция оснастки является неотъемлемой частью технологии ДС с ТСД, самостоятельным технологическим параметром.

Созданная методика по разработке технологии соединения материалов при помощи ТСД, а также разработанные на основе данной методики конкретные технологические приспособления и процессы ДС с ТСД оказались очень актуальными и практически значимыми для современного производства.

Для изготовления армированных твердым сплавом марки ВК20-КС через прослойку никеля Н2 толщиной 0,1 мм пуансонов и матриц вырубных штампов из стали 4Х5МФС были разработаны термокомпрессионные устройства одноосного сжатия с клиновой системой установки начального зазора (зажима) универсального типа со стягивающими элементами прямоугольного поперечного сечения для последовательной сварки (рис. 5.9, а) и с возможностью одновременной сварки (рис. 5.9, б) элементов пуансонов и матриц.

Разработаны нагружающие устройства, позволяющие проводить осадку с заданной скоростью деформации, а также сжимать соединяемые детали по определенной программе или вести процесс сварки в циклическом режиме.

Получает развитие установки с ударным нагружением. При изготовлении микроизделий электронной техники применяют механизм сжатия с автоматической корректировкой сварочного давления с учетом разности атмосферного и рабочего давления в вакуумной камере (рис. 5.6).

Температура сварки определяет условия протекания ряда температурно зависимых процессов: возникновение, перемещение и аннигиляцию дефектов кристаллической решетки, диффузионные процессы, механизм и скорость ползучести, релаксацию внутренних напряжений, разрыв и восстановление химических связей и т.п.

Сварочные процессы и оборудование

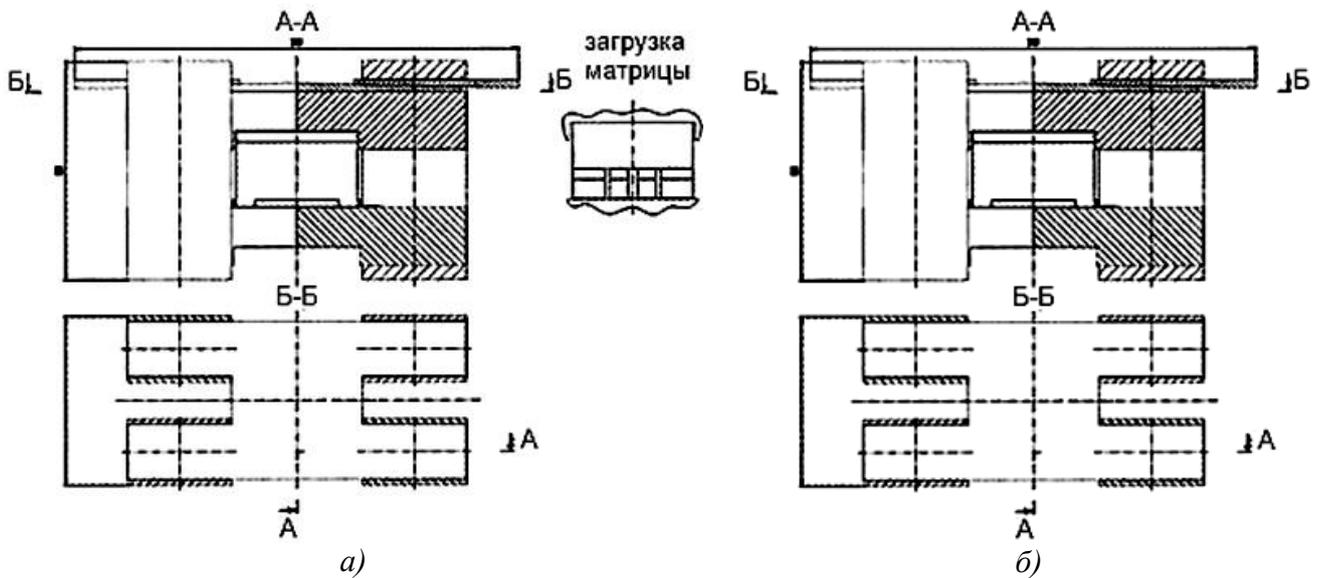


Рис. 5.9. Термокомпрессионные устройства одноосного сжатия: а – с пуансоном или матрицей вырубных штампов с клиновой системой установки начального зазора универсального типа; б – то же, но с возможностью одновременного соединения элементов пуансонов и матриц, армированных твердым сплавом

Температура сварки металлических материалов ведется, как правило, при температурах $0,7 \dots 0,8$ температуры плавления более легкоплавкого из соединяемых материалов.

При сварке материалов, образующих соединения адгезионного типа, когда достижение высокой прочности связано с образованием активных центров атом-вакансионной природы, верхняя граница температурного интервала сварки может приближаться к температуре плавления металла и составлять в гомологической шкале $0,96 \dots 0,98$. Это характерно, например, для сварки алюмооксидных керамик, кварцевого стекла, феррит-гранатов с медью, никелем, железом и их сплавами. При сварке феррит-шпинелей с металлами эта граница может существенно снижаться вследствие интенсивного падения прочности при высоких температурах, особенно с учетом объемного фактора, опасности изменения магнитных свойств феррита.

При ДС в вакууме применяют несколько видов источников теплоты, позволяющих получать различные температуры нагрева. По способу превращения энергии в тепло их можно разделить на следующие группы: индукционные, радиационные, электроконтактные, электронно-лучевые и газоразрядные. Помимо указанных источников нагрева при диффузионной сварке могут быть использованы и другие, например, дуговые, плазменные, светолучевые и т.д. Каждый источник нагрева обладает определенными преимуществами и недостатками.

Поэтому при их выборе необходимо учитывать температуру нагрева при сварке, производительность, габариты, форму и материал свариваемых деталей, а также стоимость оборудования и эксплуатационные расходы.

Одним из основных требований к современным системам нагрева является необходимость выдержать температурный режим сварки с контролируемой скоростью нагрева и охлаждения.

Индукционный нагрев широко применяется в установках диффузионной сварки, так как он наиболее полно отвечает требованиям, которые предъявляет процесс соединения к нагреву деталей.

К преимуществам данного вида нагрева можно отнести: высокую скорость нагрева, относительную равномерность нагрева зоны соединения, готовность к действию в любой момент времени, возможность автоматизации процесса, возможность получения при нагреве высоких температур, бесконтактность нагрева, возможность питания нескольких установок от одного генератора ТВЧ.

Наиболее крупной серией отечественной промышленностью выпущена универсальная установка типа УДС-2. До настоящего времени установки этого типа успешно применяются в промышленности.

В УДС-2 сварочная камера изготовлена из коррозионностойкой стали, значительно улучшена система ее охлаждения, что позволило усовершенствовать предельный вакуум и повысить производительность установки.

Применение высокочастотного генератора типа ГВЧ-7 обеспечивает высокую стабильность процесса нагрева при сварке деталей диаметром до 80 мм. Все контрольно-измерительные приборы и управляющие элементы выведены на лицевую панель.

Радиационные источники нагрева с керамическими и металлическими излучателями широко применяются в установках ДС для нагрева изделий небольших габаритов. Их основные преимущества – это возможность равномерного нагрева при соответствующем расположении нагревателей; удобство и простота как ручного, так и автоматического регулирования температуры; возможность нагрева тонколистовых и не токопроводящих материалов; невысокая стоимость по сравнению с другими источниками нагрева; возможность одновременного нагрева большого количества свариваемых деталей; компактность.

На рис. 5.10 показана принципиальная схема устройства с радиационным нагревом свариваемых деталей.

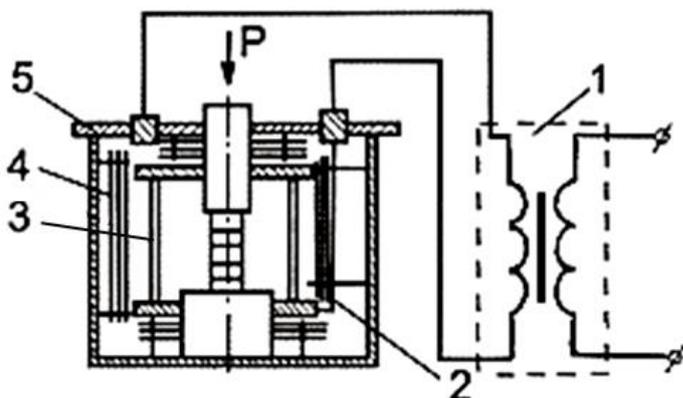


Рис. 5.10. Принципиальная схема устройства с радиационным нагревом

Ток от вторичной обмотки трансформатора (1) проходит через токоподводы (2) и нагреватели (3). Так как сопротивление нагревателей велико, то при прохождении тока в них выделяется определенное количество теплоты. В результате этого температура нагревателей повышается до необходимых величин. Тепло от нагревателей за счет лучистого теплообмена

передается свариваемым деталям. Для защиты стенок камеры (5) от теплового излучения вокруг нагревателей устанавливаются тепловые экраны (4). Материалом для экранов служит обычно тонколистовая нержавеющая сталь или листовой молибден. Экраны тщательно полируют для лучшего отражения лучистой энергии. Количество экранирующих слоев зависит от температуры нагрева. Обычно экраны изготавливают из 3...8 слоев.

Конструкции устройств с радиационным нагревом разнообразны. По температуре нагрева их делят на три группы, низкотемпературные ($T_{\text{нагр}} < 600...700$ °С), среднетемпературные ($T_{\text{нагр}} < 700...1200$ °С) и высокотемпературные ($T_{\text{нагр}} > 1200$ °С). Теплопередача в этих устройствах в условиях вакуума осуществляется только излучением, в газовых средах – излучением и конвекцией. Низко – и среднетемпературные устройства выполняют с металлическими элементами сопротивления, в большинстве случаев в виде проволочных спиралей или прямых стержней. Прямые стержни обычно собирают в конструкцию по форме, напоминающей «беличье колесо».

Высокотемпературные устройства выполняются с нагревателями в виде графитовых, силитовых стержней или с металлическими элементами из тугоплавких металлов (молибдена, вольфрама и других).

Основными материалами для нагревательных элементов в установках ДС для рабочей температуры до 800...1000 °С являются хромоникелевые сплавы – нихромы и хромоалюминиевые сплавы. Распространены марки двойного нихрома Х20Н80 и Х20Н80ТЗ. Иногда в качестве нагревательных элементов с рабочей температурой до 800 °С можно применять хромоникелевые нержавеющие стали Х25Н20С2 и Ч23318.

Хромоалюминиевые сплавы ЭИ-595 (ОХ23Ю5) и ЭИ-626 (ОХ27Ю5Л) дают наибольшую рабочую температуру до 1300 °С и по стоимости ниже нихромов. Для высокотемпературных устройств применяют карборундовые нагреватели в виде стержней диаметром от 6 мм и выше. Карборундовые нагреватели, известные под названием силитовых, с течением времени изменяют свое сопротивление, в связи с чем питание их производится от трансформатора с регулируемым напряжением.

Кроме карборундовых нагревателей для температур от 1400 до 2800 °С применяют нагреватели из графита, молибдена, тантала, вольфрама и ниобия.

Радиационный нагрев за счет теплоизлучения от нагревательных элементов имеет ряд значительных недостатков: длительное время нагрева и охлаждения рабочего пространства, трудность получения температур более 1200 °С, необходимость применения большого числа экранов и достаточно низкий КПД.

Основные преимущества нагрева кварцевыми галогенными лампами с рефлекторами применительно к оборудованию ДС – снижение энергоемкости в 1,5...2 раза по отношению к радиационному и индукционному способам нагрева; снижение металлоемкости в 1,5 раза, так как отпадает необходимость в печном трансформаторе или высокочастотном генераторе; снижение инерционности системы нагрева по отношению к радиационному способу в 2...3 раза; повышение точности регулирования скорости нагрева и выдержки температуры в рабочей

зоне в 3...5 раз по отношению к индукционному способу нагрева; значительное облегчение технического обслуживания, что повышает надежность оборудования. На основе кварцевых галогенных ламп создана установка ДСВ-901 (рис. 5.11).

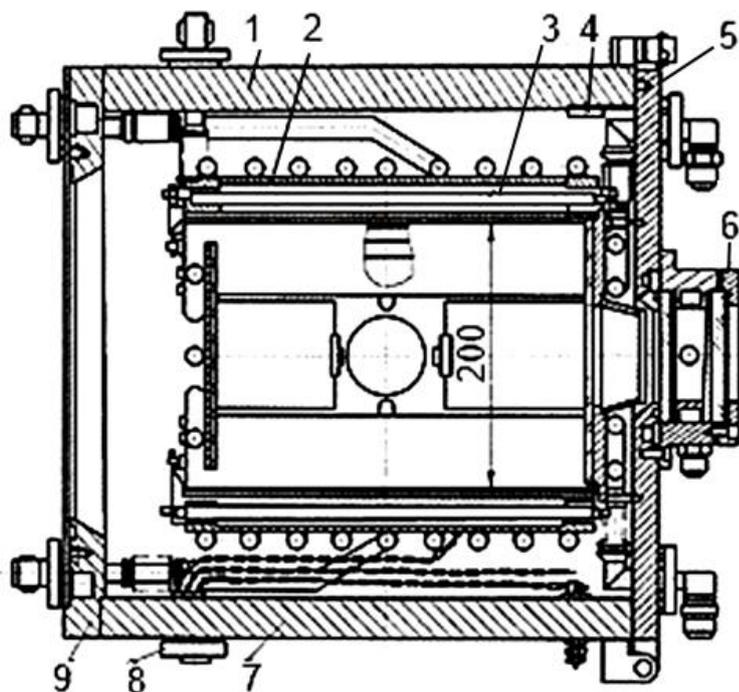


Рис. 5.11. Сварочная камера установки типа ДСВ-901

Сварочная камера установки выполнена из коррозионностойкой стали и имеет прямоугольную форму. На боковых стенках (9) (верхней (1) и нижней (7) установлены охлаждаемые рефлекторы (2) и кварцевые галогенные лампы (3) типа КГТ220-1300.

На боковых стенках камеры (9) установлены также электрические вводы (4) и выходы термопар (8). Загрузка свариваемых деталей осуществляется через дверь (5), которая снабжена окошком (6) для визуального наблюдения за процессом сварки.

Недостатками рассматриваемой системы нагрева является:

относительно малый срок службы экранирующего кварцевого стекла, предохраняющего кварцевые галогенные лампы от напыления из рабочей зоны (практически этот срок может быть оценен в 100 ч, после чего данное стекло необходимо заменить или очистить от напыления); сложность в конструировании системы, обеспечивающей длительную выдержку температуры в рабочей зоне выше 1273 К.

Электронно-лучевые источники нагрева. Они обладают рядом важных преимуществ, из которых наиболее существенными являются следующие: локальный нагрев соединяемых деталей до любой требуемой температуры; широкий диапазон регулирования мощности, идущей на нагрев деталей; высокий КПД (около 75...80 %); большая скорость нагрева, превышающая в 5...6 раз скорость нагрева токами высокой частоты.

Известные источники электронного нагрева, применяемые для сварки и плавки металлов, в установках ДС не применяются, так как основными элементами этих источников является пушка с регулированием мощности нагрева током накала катода. Инерционность таких пушек довольно велика.

Для ДС были разработаны новые источники нагрева, учитывающие специфику процесса соединения. В настоящее время используют три типа источников нагрева: кольцевую триодную пушку, электронно-лучевой источник нагрева с тремя аксиальными электронно-оптическими системами и электронно-лучевую радиальную систему.

Сварочные процессы и оборудование

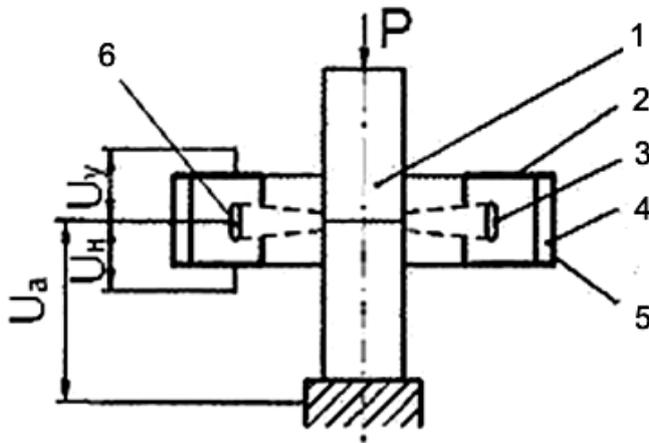


Рис. 5.12. Принципиальная схема электронной кольцевой пушки

Кольцевая пушка имеет простую систему для эмиссии электронов и их фокусировки (рис. 5.12). На вольфрамовый катод (3) подается напряжение 5...8,5 кВ, в результате чего между катодом (3) и анодом (6) создается ускоряющее поле. Электроны, эмитируемые накалившимся катодом, разгоняются ускоряющим напряжением и сформированные в кольцевой пучок попадают на соединяемые детали (1) и нагревают их.

Фокусирующий электрод (2) находится под отрицательным потенциалом относительно катода. Этот потенциал может изменяться в пределах 0...1,2 кВ, при этом ток луча соответственно изменяется от 0 до 300 мА. Кольцевой луч фокусируется электродами пушки на свариваемых деталях в пояс шириной 4...5 мм.

Ввиду того, что ускоряющее напряжение приложено между катодом и соединенными деталями, процесс сварки происходит в электрическом поле высокой напряженности (2...4 кВ/см).

К недостаткам кольцевой пушки следует отнести: небольшой срок службы вольфрамового катода (порядка 20...30 часов); не универсальность, так как каждой свариваемой детали или группы деталей нужна своя пушка.

Основным достоинством такой пушки является простота изготовления и малая стоимость.

Электронно-лучевой источник нагрева с тремя электронно-оптическими системами. Перечисленные недостатки кольцевых пушек устраняются аксиальными электронно-оптическими системами (ЭОС), в которых полый анод установлен между катодом и нагреваемой деталью. Основное отличие аксиальной системы (рис. 5.13) от кольцевой пушки состоит в том, что электронный луч формируется и ускоряется в электрическом поле электронной пушки.

Электроны, сфокусированные и ускоренные электростатическим полем пушки, проходят через отверстие в аноде, попадают в эквипотенциальное поле, где фокусируются и направляются электромагнитной фокусирующей линзой (7) и отклоняющей системой (8) в зону сварки.

Сварочные процессы и оборудование

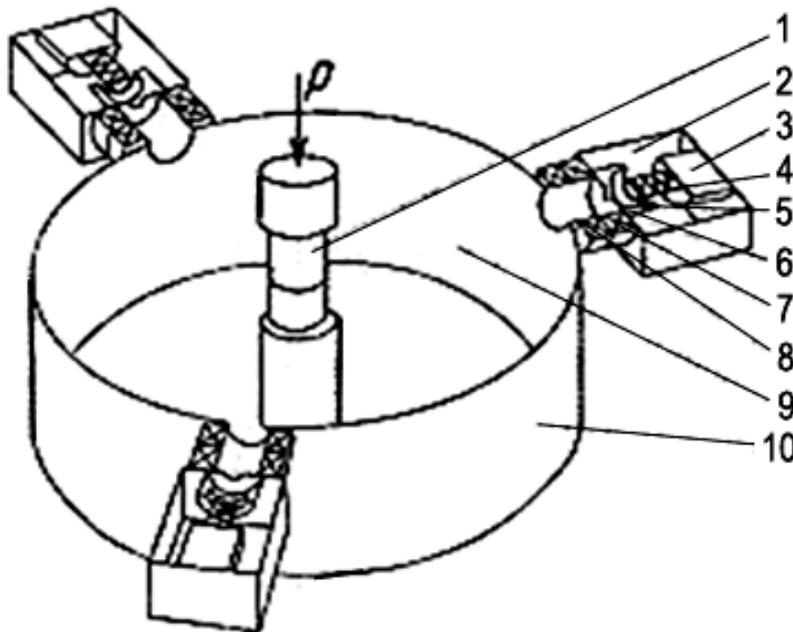


Рис. 5.13. Принципиальная схема источника нагрева с тремя аксиальными электронно-оптическими системами: 1 – свариваемые детали; 2 – электронно-оптическая система; 3 – подогреватель; 4 – катод; 5 – управляющий электрод; 6 – анод; 7 – фокусирующая электромагнитная линза; 8 – отклоняющая система; 9 – электронный луч; 10 – вакуумная камера

Электромагнитные отклоняющие системы, установленные в горизонтальной плоскости под углом 120° , производят отклонение и развертку лучей с частотой 50 Гц на угол до 12° . При этом на свариваемых деталях (1) создается постоянный кольцевой пояс нагрева. Ширина пояса и интенсивность нагрева регулируются электромагнитными фокусирующими линзами. Необходимая для нагрева мощность изменяется с помощью запирающего напряжения, подаваемого на управляющие электроды пушек (5). Каждая электронная пушка позволяет получать ток эмиссии до 500 мА при ускоряющем напряжении 10 кВ. Минимальный диаметр фокального пятна на поверхности свариваемого металла составляет 2,5...3 мм.

Катоды (4) электронных пушек изготавливаются из гексоборида лантана. Оптимальная рабочая температура катода 1650°C . Прохождение тока луча всех трех пушек через анодное отверстие составляет 96...98 %.

Аксиальные электронно-оптические системы обеспечивают концентрированный нагрев в зоне соединения, что позволяет: сваривать тугоплавкие металлы, сплавы и керамику.

Источник нагрева этого типа достаточно универсален и может использоваться для нагрева изделий различных габаритов. Точность установки свариваемых деталей по высоте и в горизонтальной плоскости относительно ЭОС не имеет значения, так как электронные лучи легко фокусируются с помощью отклоняющих систем в зоне сварки.

Электроконтактные источники нагрева. К этим источникам относятся установки контактного нагрева. Нагреваемые детали включают во вторичную цепь трансформатора, и пропускают через них ток большой величины.

На рис. 5.14 показана упрощенная схема электроконтактного нагрева свариваемых деталей.

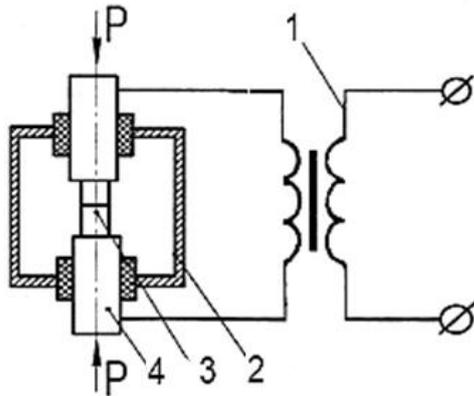


Рис. 5.14. Схема устройства с электроконтактным нагревом: 1 – трансформатор; 2 – вакуумная камера; 3 – нагреваемые детали; 4 – токоподводящие электроды

Положительными качествами этого способа нагрева являются быстрый и равномерный нагрев, так как тепло выделяется по всему сечению заготовки, низкий удельный расход энергии (высокий КПД), более низкая температура детали в месте контакта с электродом, небольшие габариты трансформаторов и простота их обслуживания.

Однако такой способ нагрева имеет и недостатки. Заготовки должны быть одинакового сечения по длине, так как в противном случае элементы их с меньшим сечением будут нагреваться значительно быстрее, чем другие места заготовок. Сечение заготовок должно

быть не более (60...70 мм), иначе намного увеличивается время нагрева и резко снижается КПД.

Необходим хороший контакт концов заготовки с электродами, подводящими ток. Если контакт слабый, то в этом месте увеличивается сопротивление и происходит перегрев заготовок.

Электроконтактные источники нагрева находят применение в первую очередь в установках для сварки заготовок инструмента (метчиков, сверл и т.д.) и ряда аналогичных изделий.

Системы нагрева в поле тлеющего разряда используются для ДС изделий небольших габаритов и массы (1,0...1,5 кг). Малые габаритные размеры изделий и простота систем нагрева, позволяют создать автоматические установки для потоочно-массового производства, и установки для мелкосерийного производства. Обеспечивают возможность нагрева изделий различных конфигураций; в широком диапазоне интенсивности нагрева; позволяет совмещение в едином цикле нагрева нескольких операций (очистки свариваемых поверхностей – сварки – термохимической обработки).

Нагрев свариваемых деталей в поле тлеющего разряда обусловлен превращением кинетической энергии положительных ионов в тепловую при бомбардировке катода. Явление катодного распыления объясняется тем, что при ударе положительного иона о поверхность катода происходит сильный разогрев металла на очень малом участке. Благодаря высокой теплопроводности металла температура локального нагретого участка быстро падает, и средняя температура катода остается сравнительно низкой. Эффективный нагрев тлеющим разрядом возможен при давлениях не менее $1 \times 10^{-1} \dots 1 \times 10^{-2}$ Па.

На рис. 5.15 показана принципиальная электрическая схема нагрева тлеющим разрядом.

Сварочные процессы и оборудование

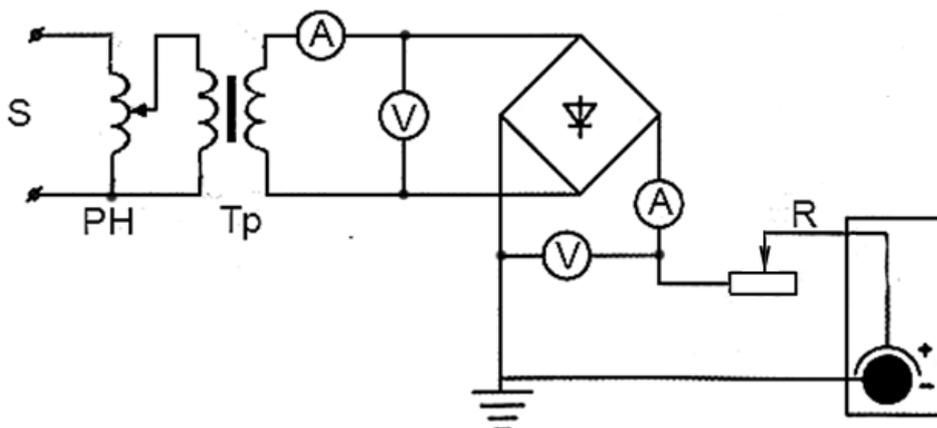


Рис. 5.15. Принципиальная электрическая схема нагрева тлеющим разрядом

Тлеющий разряд существует в широком диапазоне давлений – от тысячных долей Па до нескольких атмосфер, он обладает гаммой технологических свойств. При давлениях $10^{-1} \dots 10^{-3}$ Па происходит распыление и очистка катода (деталей) за счет ионной бомбардировки. При давлениях $1 \dots 20$ Па происходит, нагрев катода по всей поверхности, что используется для высокотемпературной термохимической обработки металлов (азотирование, цементация и т.д.). При дальнейшем повышении давления плотность тока в разряде растёт пропорционально квадрату величины давления, что позволяет применять его для целей сварки и пайки.

В качестве рабочих газов для нагрева в тлеющем разряде могут использоваться азот, аргон, гелий, углекислый газ, аммиак, пары ацетона и различные смеси газов. Исследованиями установлено, что тлеющий разряд обеспечивает необходимые условия для ДС различных материалов (сталей, меди, титана, молибдена и др.).

Время выдержки является параметром процесса, который для конкретной пары материалов зависит от выбранной температуры и сварочного давления. Соотношение этих трех параметров определяет полноту протекания всех стадий процесса соединения. Время формирования физического контакта (часто наиболее длительная из стадий) в определенной мере зависит от качества подготовки поверхностей. Время выдержки при сварке меняется и при изменении относительной толщины деформируемого элемента – металла, поскольку изменение напряженного состояния влияет на скорость высокотемпературной пластической.

Уменьшение скорости охлаждения обеспечивает условия для более полной релаксации внутренних напряжений, возникающих при изменении температуры из-за различия ТКЛР и теплофизических свойств металла и керамики. В некоторых случаях целесообразно применять ступенчатое охлаждение или давать промежуточные отжиги. В этой связи ручное регулирование температурного режима нагрева и охлаждения оказывается весьма затруднительным.

Защитные среды. Для защиты свариваемых металлов от окисления и насыщения азотом и водородом окружающей атмосферы в процессе нагрева и

сварки используют разнообразные защитные среды, состав которых зависит не только от химической активности материала заготовок, но и от экономичности и технологичности их использования.

Вакуум – наилучшая по чистоте защитная среда, однако, в тех случаях, когда необходимо сваривать сплавы, содержащие легко сублимирующие компоненты (латунь, бронза, магниевые сплавы и т.д.), применение вакуума нежелательно. Испаряющиеся в вакууме компоненты сплавов приводят в негодность вакуумную систему. Одновременно происходит изменение состава свариваемого материала.

Вакуум в сварочной камере очищает свариваемые поверхности материалов от оксидных пленок и предохраняет их от повторного окисления. При сравнительно высоких температурах порядка 700...800 К вакуум обеспечивает удаление с поверхностей оксидных материалов гидроксильных групп, насыщающих свободные связи. Многочисленные эксперименты показывают, что качественные соединения различных материалов можно получать в вакууме и при 1,33 Па. Сварка алюмооксидных керамик с медью удовлетворительно осуществляется в водороде с точкой росы 5...20 °С. Для сварки всех марок ферритов с металлами водород является неприемлемой средой. В этом плане вакуум с остаточным давлением 1...10 МПа, создаваемый откачными средствами серийных промышленных установок, является более универсальной средой. Однако и в этом случае необходимо учитывать возможность изменения некоторых свойств феррит-шпинелей и пьезо-керамик при нагреве в вакууме. При сварке боросиликатных стекол с металлом удовлетворительные результаты получены при проведении процесса в плазме тлеющего разряда.

Широко применяют в качестве защитных средств нейтральные (аргон, гелий, азот и их смеси) и активные (водород, углеводороды, реже углекислый газ) газы, а также их смеси с инертными газами.

Состав защитного газа подбирают, исходя в первую очередь из химической активности системы металл – газ в условиях сварки. Например, для твердых сплавов, получаемых спеканием в водороде, водород является естественной защитной средой. В то же время водород крайне опасен при сварке титановых сплавов. Азот, являющийся вредной примесью в аргоне и гелии при сварке активных металлов, служит прекрасной защитной средой при сварке меди. Углеводороды целесообразно применять при сварке сталей и твердых сплавов, небольшие добавки водорода и углеводородов в нейтральные газы при сварке ряда сталей и сплавов обеспечивают восстановительные свойства защитной газовой смеси, не вызывая сколько-нибудь существенного наводороживания или карбидизации поверхности свариваемых материалов за время сварки.

Для защиты углеродистых сталей и чугунов приемлем углекислый газ с добавками углеводородов. При выборе состава защитного газа следует учитывать свойства источника энергии, работу нагревательных элементов и технологической оснастки в защитной среде. Например, при индуктивном нагреве можно использовать неэлектропроводную среду любого состава, а электронно-лучевой нагрев осуществим лишь в вакууме.

Несомненно, что в каждом конкретном случае инженер-технолог при определении оптимального состава защитной среды должен учитывать такие существенные факторы, как ее стоимость, безвредность применения, тип производства, конструктивные и технические особенности свариваемого изделия, а также возможности сокращения технологического цикла сварки путем совмещения операций.

Подготовка поверхностей соединяемых материалов может существенно влиять на качество получаемых сварных соединений. Поверхность твердого тела, даже тщательно обработанного, всегда волниста и шероховата. При сближении таких поверхностей их начальное соприкосновение происходит лишь по отдельным точкам. Размеры площади касания зависят от свойств материалов, способа обработки поверхности и ряда других причин. Кроме того, реальные поверхности твердых тел покрыты пленками оксидов, адсорбированных полярных молекул, газов, воды, препятствующих образованию связей между соединяемыми поверхностями.

Очень перспективен способ очистки свариваемых поверхностей ультразвуком. Применение ультразвуковых колебаний для очистки свариваемых поверхностей повысило предел прочности сварных соединений при изгибе с 700...800 до 800...1300 МПа.

Другая серия экспериментов состояла в определении прочности соединения в зависимости от способов удаления с поверхности металлов адсорбированных пленок (масел, жиров, пыли, грязи, краски и т.п.), мешающих сближению соединяемых поверхностей.

Жировые пленки удаляются различными способами: протиркой спиртом, ацетоном, четыреххлористым углеродом и прокаливанием в вакууме. Очистка металлических поверхностей методом травления основана на способности кислот и щелочей растворять окислы. В результате этого поверхность металлов, полученная при травлении кислотой, имеет ровный рельеф с равномерной пленкой по всей поверхности.

Кроме того, поверхности образцов очищали от адсорбированных и окисных пленок предварительным прокаливанием в вакууме при температурах, достаточных для испарения поверхностных слоев металлов и возгонки окисных пленок; состояние поверхностных слоев характеризовалось повышенной энергией активации.

Соединяемые поверхности металлов можно обрабатывать следующими способами: черновое точение; тонкое получистовое точение; шлифование; полирование; все остальные условия сохранялись одинаковыми. При черновой обработке давления недостаточно для обеспечения максимальной площади истинного контакта. На поверхности контакта сохранялись неровности, препятствовавшие непосредственному контакту чистых поверхностей металла при малых давлениях. При получистовом точении рельеф поверхностей более гладкий, что для данного режима сварки позволило получить прочность соединения на 20 % выше.

При шлифовании прочность соединения оказалась на 10 % меньше по сравнению с тонким получистовым точением. Возможно, при абразивной обработке

на поверхность зачищенного металла попадали твердые частицы абразива, препятствовавшие диффузионным процессам.

Контрольные вопросы

1. В чём заключается сущность диффузионной сварке.
2. Какие материалы соединяются диффузионной сваркой.
3. Укажите основные преимущества диффузионной сварки.
4. Для изготовления каких изделий применяется система с односторонним аэродинамическим сжатием сварных изделий.
5. Зачем в установках диффузионной сварки применяются гидравлические системы.
6. Укажите источники нагрева деталей при диффузионной сварке.

ГЛАВА 6 ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ И ЕЕ РАЗНОВИДНОСТИ

Электрическая контактная сварка представляет собой технологический процесс образования неразъемных соединений в результате нагрева металлических деталей протекающим по ним электрическим током, расплавления и сжатия их с последующим охлаждением зоны сварки за счет теплопроводности в тело свариваемых деталей и электродов.

Контактная сварка объединяет большую группу методов сварки, отличительной особенностью которых является надежность получаемых соединений, высокий уровень автоматизации и механизации процесса сварки, высокая производительность и культура производства (рис. 6.1), [2, 6].

По способу получения сварных соединений выделяют стыковую, точечную и шовную контактную сварку.

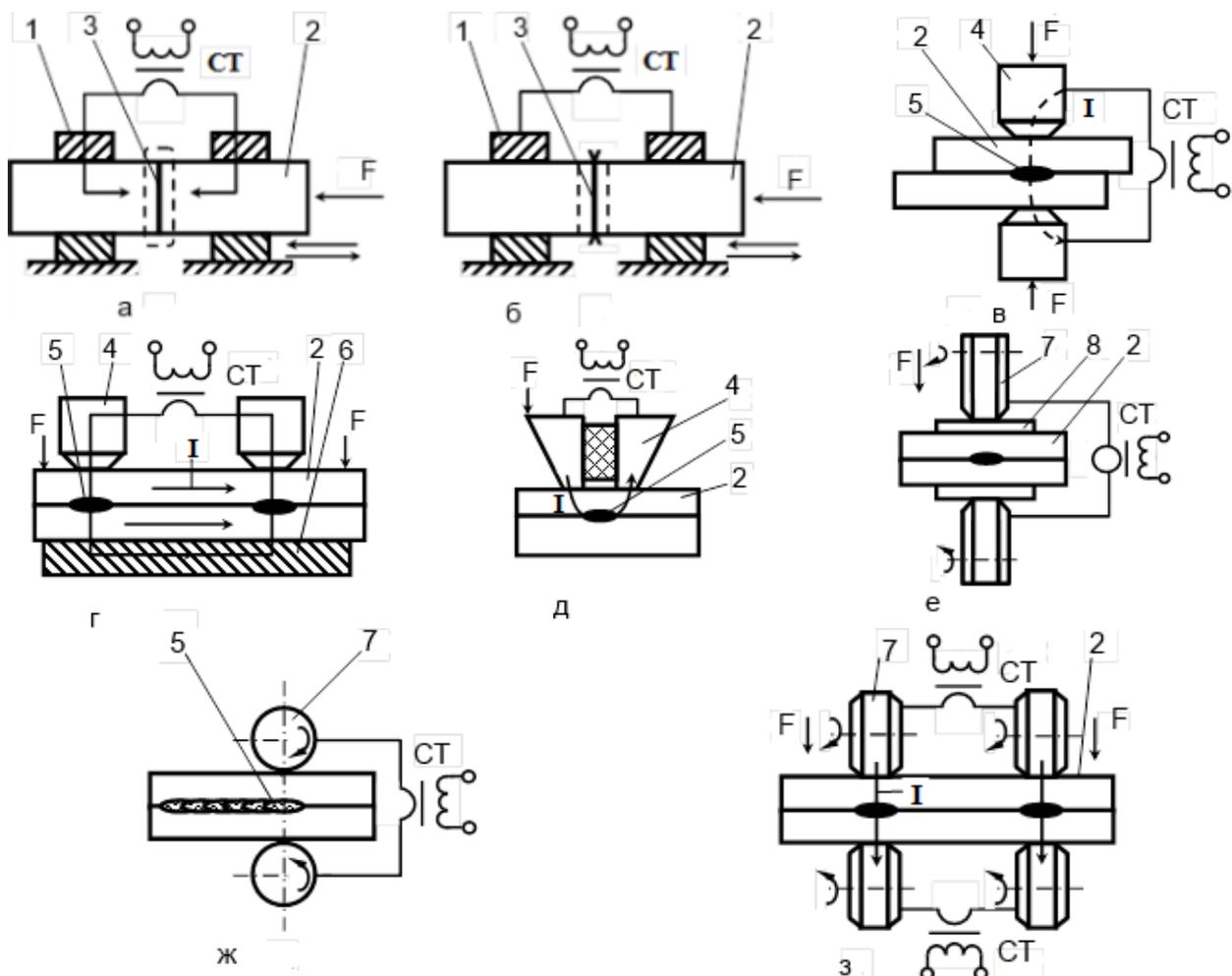


Рис. 6.1. Схемы основных методов контактной сварки: стыковая сварке сопротивлением (а) и оплавлением (б); контактная сварка одноточечная (в); двухточечная (г); односторонняя (д); роликовая сварка через подкладные элементы (е); одной парой (ж); двумя парами (з)

Стыковая сварка. Это способ контактной сварки, при котором детали соединяются по всей площади их касания (площади поперечного сечения) и применяются для получения неразъемных соединений прутков, труб, валов, рельс и др. Различают два способа стыковой сварки – сопротивлением и оплавлением.

Стыковая сварка сопротивлением. При сварке сопротивлением (рис. 6.1, а) свариваемые детали 2 закрепляют в токоподводящих башмаках 1 и сжимают с усилием сжатия. Затем от сварочного понижающего трансформатора СТ ток к свариваемым деталям 2 подводится через водоохлаждаемые токоподводы. В месте сварки 3 за счет выделяющейся джоулевой теплоты в переходном контактном сопротивлении происходит, нагрев деталей до температуры, близкой к температуре плавления металла $(0,8...0,9) \cdot T_{пл}$. После этого резко увеличивают усилие сжатия (осадка деталей), с одновременным прекращением подачи электрического тока, в результате чего в твердой фазе образуется сварное соединение с увеличением поперечного сечения в зоне сварки. Машины для стыковой сварки сопротивлением показаны на рис. 6.2, рис.6.3.

Количество энергии Q (Дж), выделяющейся между электродами,

где: R_k – контактное сопротивление между деталями, Ом; R_d – сопротивление детали от электрода до места сварки Ом; I – сварочный ток, А; t – время прохождения тока, с.

$$Q = \int_0^t [R_k(t) + R_d(t)] \cdot I^2(t) dt, \quad (6.1)$$

где: R_k – контактное сопротивление между деталями, Ом; R_d – сопротивление детали от электрода до места сварки Ом; I – сварочный ток, А; t – время прохождения тока, с.



Рис. 6.2. Машина для стыковой сварки сопротивлением с ручным приводом осадки: 1 – суппорт неподвижный; 2 – свариваемые детали; 3 – устройства зажимные; 4 – направляющие; 5 – рычаг привода осадки; 6 – выключатель сетевого напряжения; 7 – корпус машины; 8 – коробка подвода сетевого напряжения; 9 – подключение подачи и слива охлаждающей жидкости

Сварочные процессы и оборудование



Рис. 6.3 Машина для стыковой сварки сопротивлением с гидравлическим приводом осадки: 1 – подключение подачи (слева) и слива (справа) охлаждающей жидкости; 2 – суппорт неподвижный; 3 – суппорт подвижный; 4 – направляющие подвижного суппорта; 5 – ручка подвода (отвода) подвижного суппорта; 6 – корпус

Из уравнения (6.1) следует, что энергия Q необходимая для сварки, при весьма малой величине сопротивления в точке контакта свариваемых деталей и во избежание потерь теплоты на ненужный нагрев всей их массы, может быть получена только при больших величинах тока (сотни и тысячи ампер), протекающего через электрическое контактное сопротивление R_k в течение короткого промежутка времени t (доли или единицы секунд). Для повышения КПД контактной сварки необходимо, чтобы сопротивление цепей сварочного тока и электродов R_d было как можно меньше. Поэтому при конструировании сварочных установок источник питания стремятся как можно ближе расположить к месту сварки и использовать материалы, дающие минимальные потери энергии. Напряжение на электродах сварочных машин составляет 1...16 В.

Нагрев металла происходит в местах контакта свариваемых деталей по плоскости их соприкосновения. Это объясняется тем, что в данном месте переходное контактное сопротивление R_k будет наибольшим. Так как поверхность металла не является идеально гладкой, то свариваемые детали при их сжатии соприкасаются лишь в отдельных точках, через которые проходит электрический ток. Так как площадь точек очень мала, то в них возникает большое сопротивление прохождению электрического тока, что вызывает сильный локальный нагрев металлов. С повышением температуры в месте сварки его электрическое сопротивление возрастает, что ускоряет выделение теплоты и нагрев металла до температуры сваривания. Когда металл нагреется до пластического или оплавленного состояния, при сжатии детали произойдет их сваривание. Застывание металла в точке сварки после отключения тока происходит за счет передачи теплоты от точки сварки в соединяемые детали. Скорость охлаждения зависит от теплопроводности материала свариваемых деталей.

Как следует из (6.1), при контактной сварке нагрев зависит от времени прохождения тока. Можно нагревать детали очень быстро, применяя токи большой

величины, или нагревать детали медленно и постепенно, используя меньшие токи. Режимы сварки с применением токов большой величины при минимальном времени нагрева принято называть «жесткими». Они применяются при сварке чувствительных к нагреву легированных сталей и легкоплавких цветных металлов (металлов с малым удельным электрическим сопротивлением) и имеют следующие показатели режима сварки:

$$j = 160 - 400 \frac{A}{\text{мм}^2}; \quad P = 0,40 \dots 1,2 \text{ ГПа}; \quad t_{\text{св}} = 0,1 \dots 1,0 \text{ с.}$$

Режимы с длительным прохождением тока и низкой его плотностью называют «мягкими». Они применяются при сварке обычных углеродистых сталей, менее чувствительных к нагреву при сварке (закалке), и имеют следующие параметры:

$$j = 80 - 160 \frac{A}{\text{мм}^2}; \quad P = 0,15 \dots 0,4 \text{ ГПа}; \quad t_{\text{св}} = 0,5 \dots 3,0 \text{ с.}$$

Сварка оплавлением подразделяется на сварку непрерывным оплавлением и оплавлением с подогревом (прерывистым оплавлением), рис 6.1, б. При сварке непрерывным оплавлением детали 2 сближают при включенном сварочном трансформаторе СТ и путем сжатия осуществляется их контакт. Оплавление концов свариваемых деталей продолжается до тех пор, пока между их торцами не образуется прослойка жидкого металла 3. Затем прикладывается относительно небольшое усилие осадки F и создается сплошное металлическое соединение свариваемого стыка. Избыточный расплавленный металл выдавливается из зазора между свариваемыми деталями и образует «грат», который затем механически удаляется.

При сварке с прерывистым оплавлением, рис. 6.1, б, стыки деталей 2 предварительно подогревают методом кратковременного замыкания их торцов с последующим их размыканием. При образовании жидкой прослойки 3 по всему сечению свариваемых кромок прикладывают усилие осадки F . Сварка с оплавлением стыка деталей по сравнению со сваркой сопротивлением (без оплавления) имеет следующие преимущества: более прочный шов, не требующей большой механической обработки; меньшая мощность сварочной установки; пониженный удельный расход электроэнергии; возможность сварки различных металлов. К недостаткам – следует отнести неизбежную, хотя и небольшую потерю металла, и наличие «грата» на стыке свариваемых деталей.

Машины для стыковой сварки подразделяются по способу сварки (без оплавления стыка и с его оплавлением), назначению (универсальные и специальные) и способам установки (стационарные и переносные). Машины также различают по мощности, типу зажимных устройств и механизмам подачи. Универсальные машины используются для сварки различных деталей в мелкосерийном производстве, а специализированные – для сварки однотипных деталей в условиях серийного и массового производства.

Точечная сварка – способ контактной сварки, при котором детали свариваются по отдельным ограниченным участкам касания. При этом используются нахлесточные соединения (рис. 6.1, в, г). Детали 2 предварительно сжимаются

Сварочные процессы и оборудование

электродами 4, изготовленные из медных сплавов, и нагреваются проходящим электрическим током до появления между деталями расплавленного металла 5. Расплавленный металл удерживается в ядре от выплеска и надежно защищается от окружающей атмосферы уплотняющим поясом, представляющим собой зону пластической деформации, непосредственно примыкающую к ядру. Нагрев при точечной сварке обычно осуществляется импульсами переменного тока или униполярными импульсами относительно малой продолжительности 0,06...2,5 с.

По способу подвода тока точечная сварка может быть односторонней (рис. 6.1, в) и двухсторонней (рис. 6.1, г – схема; рис.6.4, а, б – внешний вид машины). При односторонней сварке ток поводят к каждой из деталей, а при двухсторонней – к одной из деталей.

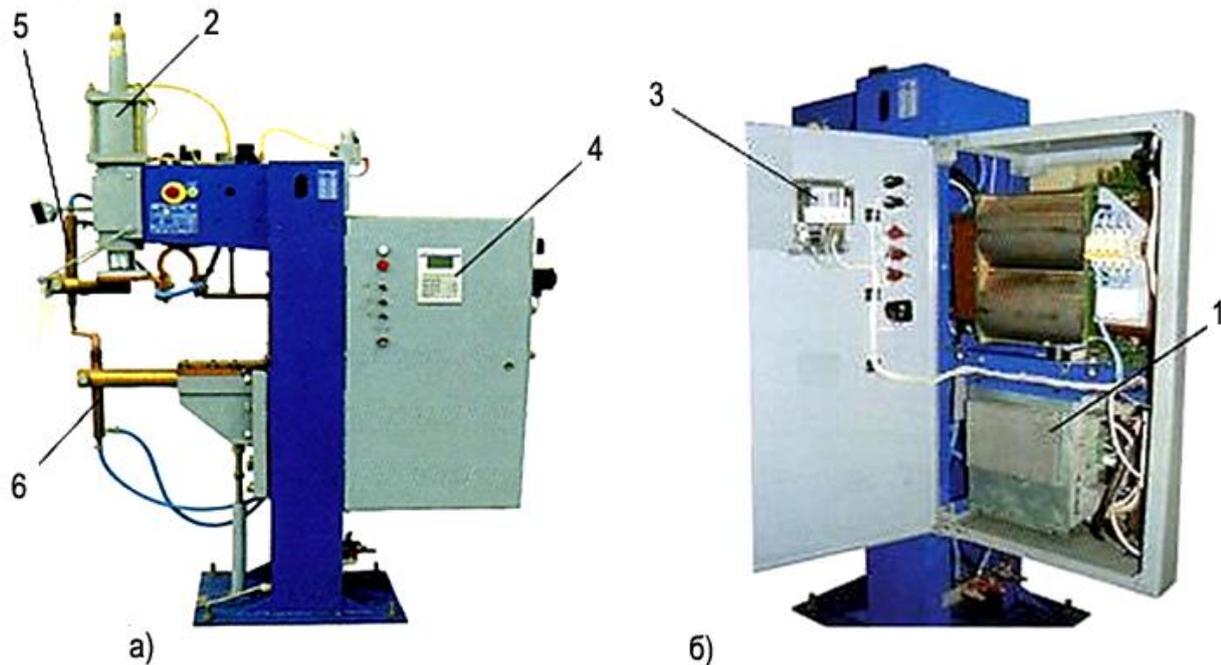


Рис. 6.4. Контактная точечная машина: а – вид с боку; б – с открытой дверью электрической части; 1 – сварочный трансформатор; 2 – механическая часть, 3 – регулятор тока, 4 – панель управления, 5 – подвижный электрод, 6 – неподвижный электрод

Контактные точечные машины в зависимости от характера перемещения электродов подразделяются на машины с радиальным ходом электрода, (рис.6.5, а) и с прямолинейным ходом, рис. 6.5, б, в.

Сварочные процессы и оборудование

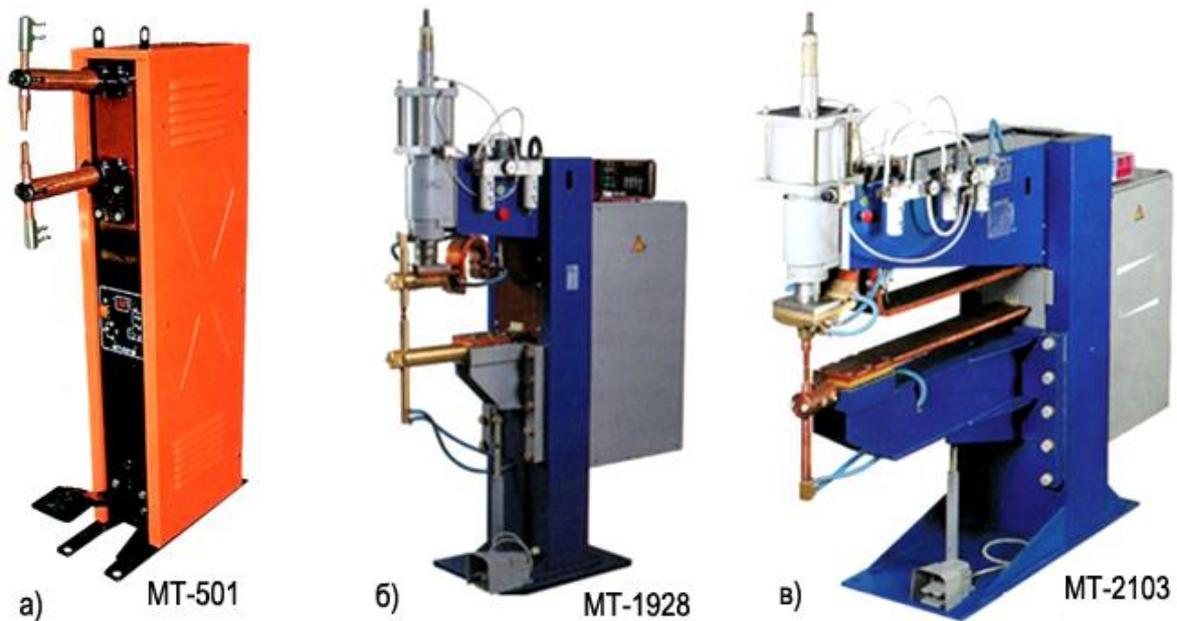


Рис. 6.5. Контактные точечные машины: *а* – с радиальным ходом электрода; *б*, *в* – с прямолинейным ходом электрода

Механическая часть сварочной машины представляет собой несущую конструкцию и устройства для импульсного сжатия свариваемых деталей.

Механизмов приводов различного назначения (привод сжатия деталей при точечной и шовной сварке, зажатия и перемещения деталей при стыковой сварке и т.д.) и ряда конструктивных элементов, создающих жесткость и прочность машины.

Сварочная машина может быть оборудована средствами сопутствующего контроля качества соединений, а также средствами механизации и автоматизации вспомогательных операций.

Шовная сварка – способ контактной сварки (рис. 6.1, *е*, *ж*, *з*), при котором между свариваемыми деталями 2 образуется непрерывное соединение (шов) путем образования последовательного ряда частично перекрывающих друг друга сварных точек 5. Подобное соединение обеспечивает получение герметичных швов. В случае шовной сварки подвод тока к деталям и их передвижение осуществляют преимущественно при помощи двух вращающихся дисковых электродов (роликов) 7, связанных с приводом усилия сжатия сварочной машины, рис. 6.6.

Как и в случае точечной сварки, металл нагревается импульсами тока различной формы без применения специальных средств защиты жидкого металла от влияния атмосферы.

Выделяют несколько видов шовной сварки: по способу подвода тока, по числу роликов и одновременно свариваемых швов. Импульсы тока могут подаваться при непрерывном перемещении деталей или электродов, или в момент их кратковременной остановки (шаговая сварка).

Сварочные процессы и оборудование

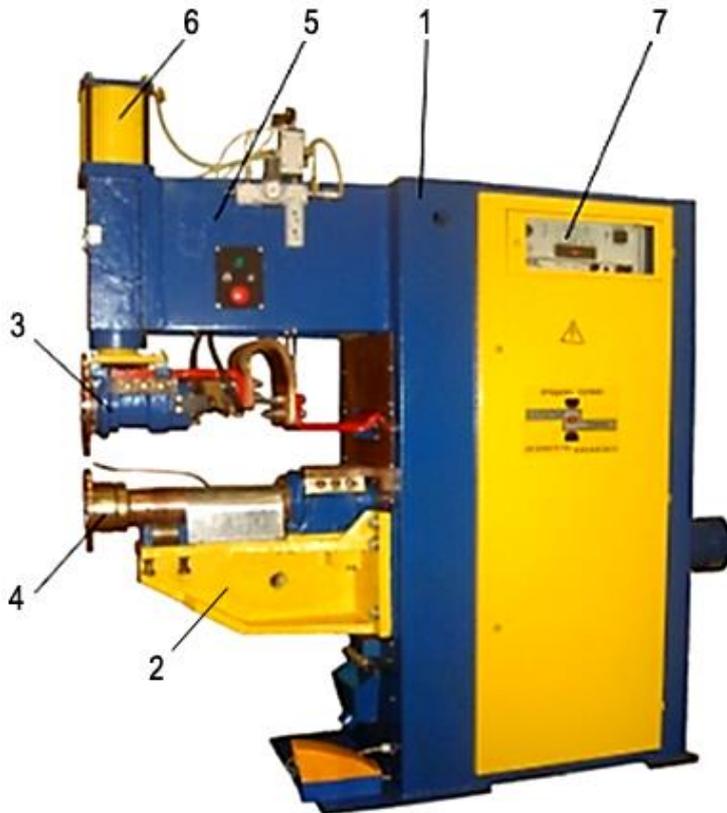


Рис. 6.6. Машина для шовной сварки: 1 – корпус машины; 2 – консоль нижняя; 3 – ролик ведомый; 4 – ролик ведущий; 5 – консоль верхняя; 6 – механизм сжатия; 7 – панель управления; 8 – педаль

Рельефная сварка – разновидность точечной сварки (рис. 6.7), при которой первоначальный контакт деталей 2 происходит по ограниченной рельефом 1 площади, предварительно формируемые на свариваемых деталях, например, в форме треугольника или трапеции в сечении. В начальный момент это позволяет достигать более концентрированного нагрева металла проходящим током от источника питания 5 через электроды 4. Нагреваясь, рельефы деформируются, и на определенной стадии процесса происходит плавление металла и образование ядра 3.

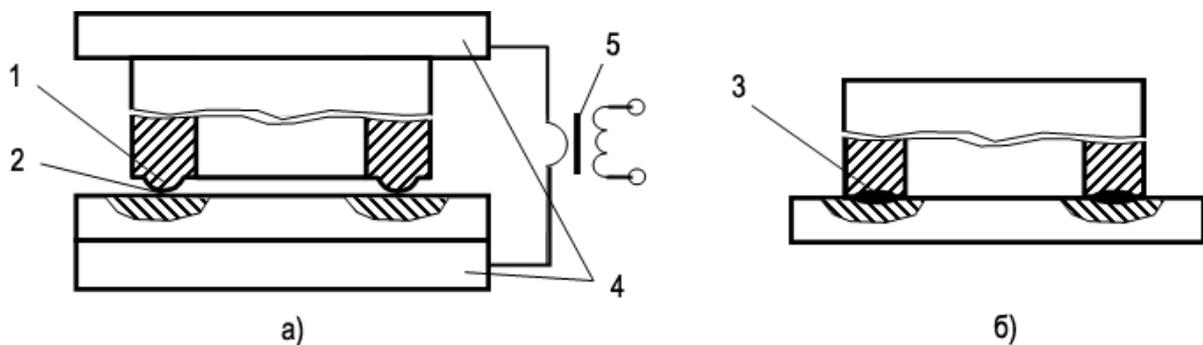


Рис. 6.7. Схема рельефной сварки: а – до сварки; б – после сварки

Образование соединений при контактной сварке указанными способами определяется протеканием рядом физико-химических процессов, составляющих теоретическую основу технологии. Машина для рельефной сварки показана на рис. 6.8.

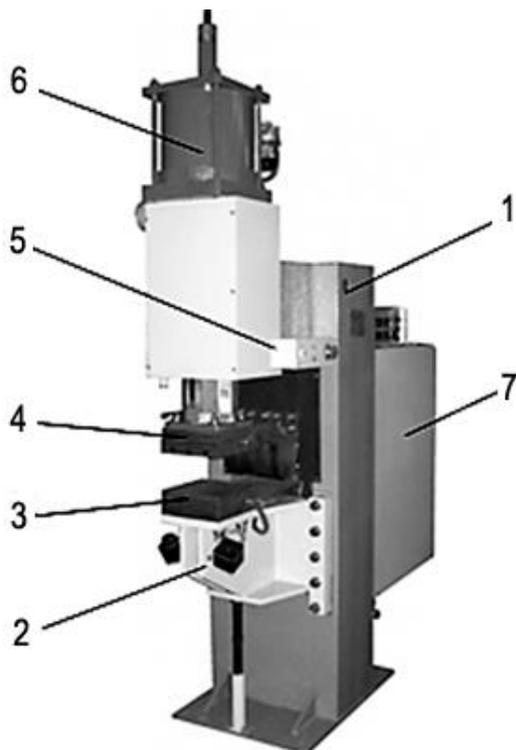


Рис. 6.8. Машина для рельефной сварки: 1 – станина; 2 – консоль нижняя; 3 – плита нижняя, не подвижная; 4 – плита верхняя; 5 – консоль верхняя; 6 – механизм сжатия; 7 – шкаф с электрической частью машины

Технология определяет требования к сварочному оборудованию, которое представляет в целом комплекс различных механизмов и устройств.

Сварочные машины для контактной сварки (рис. 6.4) имеют две основные части: электрическую (1) и механическую (2). Электрическая часть состоит из регулятора сварочного тока (3) (понижающий трансформатора специальной конструкции), токопроводящих частей (гибких шин, электродов), устройств для включения и выключения сварочного тока, его регулирования (управляемый электронный коммутатор с двумя встречно параллельно включёнными тиристорами) и программатор цикла сварки.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные способы получения сварных соединений металлов контактной сваркой.
2. Опишите принцип контактной точечной сварки.
3. Опишите принцип контактной шовной сварки.
4. Опишите принцип контактной рельефной сварки.
5. Опишите устройство сварочных машин для контактной точечной, шовной и рельефной сварки.
6. Объясните, в чем состоит схожесть и различие их устройства сварочных машин.
7. Опишите принцип контактной стыковой сварки, виды и их особенности.

ГЛАВА 7 ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ СВАРКА ПЛАВЛЕНИЯ

В ряде электротермических процессов, идущих с поглощением большого количества тепловой энергии, применяется электродуговой разряд, или электрическая дуга, которая нагревает различные среды до высоких температур, недостижимых при сжигании топлива. Термин «разряд», «дуговой разряд» возник как описание явления потери «разряд» батареей гальванических элементов или конденсаторов через газы в вакуум:

В большинстве случаев формы существования электрической дуги самые разнообразные, однако, сохранилось первоначальное название «дуга» данное, этому явлению В.В. Петровым еще в 1802 г. при описании разряда между горизонтальными электродами в воздухе. Когда высокотемпературный газ в межэлектродном промежутке под действием конвективного потока воздуха и электромагнитных сил изгибался выпуклостью вверх, принимая форму дуги или арки.

Электрическая дуга является одним из явлений, возникающих при прохождении электрического тока через газ, пары и вакуум. В обычных условиях различные газы и их смеси (воздух, аргон, гелий, азот, углекислый газ и др.) не проводят электрический ток. Проводимость возникает только тогда, когда в газовой среде появляются свободные заряженные частицы – электроны, положительные и отрицательные ионы и газ превращается в плазму.

7.1 ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГЕ

Ионизация газов. Плазмой принято называть вещество, находящееся в четвертом состоянии (в дополнение к твердому веществу, жидкому и газообразному), характеризующееся наличием нейтральных молекул и атомов, а также заряженных частиц – электронов и ионов, проводящее электрический ток и подчиняющееся законам магнитной газодинамики. Превращение газа в плазму проходит несколько стадий. Для молекулярных газов первой стадией является диссоциация – образование атомов. Возникновение в газе заряженных частиц – ионизация газа, может происходить в результате его нагрева, поглощения энергии рентгеновского или ультрафиолетового излучения, космических лучей, лучей оптического квантового генератора (лазера), действия электрического поля и др., [2, 3].

Отрицательные ионы образуются при захвате молекулой или атомом свободных электронов, что возможно лишь для электроотрицательных элементов при весьма малой скорости движения электронов. Положительные ионы возникают при потере нейтральной частицей одного или нескольких электронов.

Образование ионов требует затрат энергии извне на преодоление кулоновских сил притяжения между электроном и положительным ионом, называемой энергией (работой) ионизации $A_{и}$, которую определяют как произведение заряда электрона на потенциал ионизации $U_{и}$: $A_{и} = e_0 \cdot U_{и}$. Потенциал ионизации атома равен разности потенциалов, которую должен пройти электрон, чтобы приобрести кинетическую энергию, достаточную для ионизации атома при соударении с ним. Численно величины $U_{и}$ и $A_{и}$ равны, если $A_{и}$ выражать в электронвольтах.

Работа ионизации определяет химическую активность элемента, поскольку при ионизации отрываются валентные электроны: $A_{и} = 3,9 \dots 26,0$ эВ и составляет, например: для цезия 3,9, железа 7,9, азота 12,4, гелия 24 эВ. После отрыва наиболее слабо связанного электрона от атома могут отрываться электроны, связанные сильнее. При этом образуются многократно ионизованные ионы. Энергия ионизации при повышении кратности значительно возрастает и составляет, например, для Li 75,6 эВ (двух кратная ионизация) и для трехкратной ионизации, например для Be она составляет 153,8 эВ.

Деионизация. В любой точке стационарного разряда концентрация заряженных частиц любого типа определяется равенством скоростей образования и потерь частиц в этой точке. Ионизация в плазме приводит к разделению зарядов, но электрическое притяжение ограничивает степень возможного разделения и плазма остается квазинейтральной. Наряду с ионизацией непрерывно происходят уравнивающие её процессы деионизации. К ним относятся рекомбинация заряженных частиц в нейтральные, захват электронов (прилипание), дрейф проводимости и диффузионные процессы, выравнивающие концентрацию (амбиполярная диффузия).

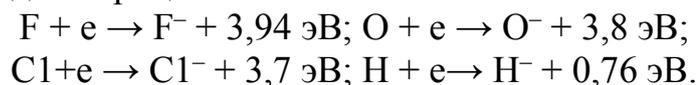
Рекомбинация. Скорость рекомбинации ионов, электронов и нейтральных частиц при их концентрации n_i , n_e , n определяется коэффициентом рекомбинации по уравнению»

$$\frac{dn_i}{dt} = \frac{dn_e}{dt} = \frac{dn}{dt} - R_n^3,$$

причем коэффициент R_n тем больше, чем больше плотность частиц. Он зависит также от типа частиц, времени их жизни и размеров ионов, от наличия близко расположенных тел (нейтральных атомов воздуха или охлаждающих стенок).

Проводимость газового промежутка определяют, прежде всего, электроны как высокоподвижные частицы. Захват электронов атомами и ионами в процессе рекомбинации можно в некоторых случаях рассматривать как процесс обратимый, а в других – как практически необратимый процесс. Например, процесс $Na^+ + e \leftrightarrow Na^0$ можно считать обратимым. Если же при сварке в состав покрытия или флюса вводят плавиковый шпат CaF_2 , то в этом случае может происходить необратимый захват электрона фтором.

Захват электронов с образованием тяжелых отрицательных ионов может осуществляться и другими атомами металлоидов, которые обладают довольно большим сродством к электрону (3...4 эВ). В дуговом разряде под флюсом из галогенов могут происходить процессы:



Порядок энергии электронного сродства таков, что указанные процессы могут считаться обратимыми. Но быстрая рекомбинация молекул из этих ионов с положительными ионами металлов (R_i велико) приводит к более интенсивной деионизации разрядного промежутка.

Электронная и ионная температура. Для обычных дуг, горящих при давлении порядка атмосферного, столб дуги представляет собой частично ионизиро-

ванную плазму. В полностью ионизированной плазме нейтральные частицы отсутствуют. Плазма дуги квазинейтральная (т.е. почти нейтральная), так как в ней отрицательный заряд электронов почти точно нейтрализует положительный заряд ионов. Так как электроны гораздо подвижнее чем положительные ионы, то электрическое поле заставляет электроны быстро уходить к аноду и столб дуги имеет положительный потенциал относительно катода.

Термическое равновесие в дуговом промежутке будет полным, когда частота появления всех возможных энергетических состояний удовлетворяет распределению Максвелла-Больцмана. В плотной среде столба дуги столкновения между частицами приводят к быстрому установлению локального равновесного состояния. Напротив, в разряженной плазме, где столкновение частиц редки, могут длительное время существовать состояния, далекие от равновесия. Столкновения частиц становятся редкими и при высоких температурах, в так называемой горячей плазме, когда энергия теплового движения $kT = 10 \dots 100$ эВ и более. Плазма, имеющая kT порядка 1 эВ (11600 К), в физике считается холодной плазмой.

Основное понятие термодинамики – понятие температуры, которая характеризует величину энергии и ее распределение между частицами вещества. В разряженной или в горячей плазме электронная T_e и ионная T_i температуры не равны между собой (рис. 7.1), а с увеличением давления газа их величины и распределение по сечению столба дуги становятся почти одинаковыми (рис.7.1 и рис.7.2, а).

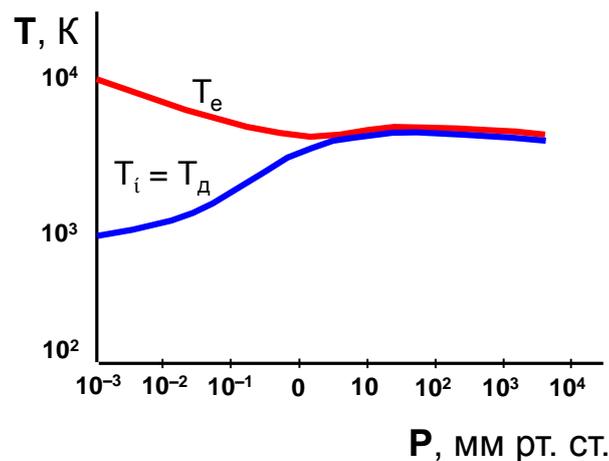


Рис. 7.1. Электронная температура T_e и температура газа $T_d = T_i$ в столбе дуги в зависимости от давления

Сварочные процессы и оборудование

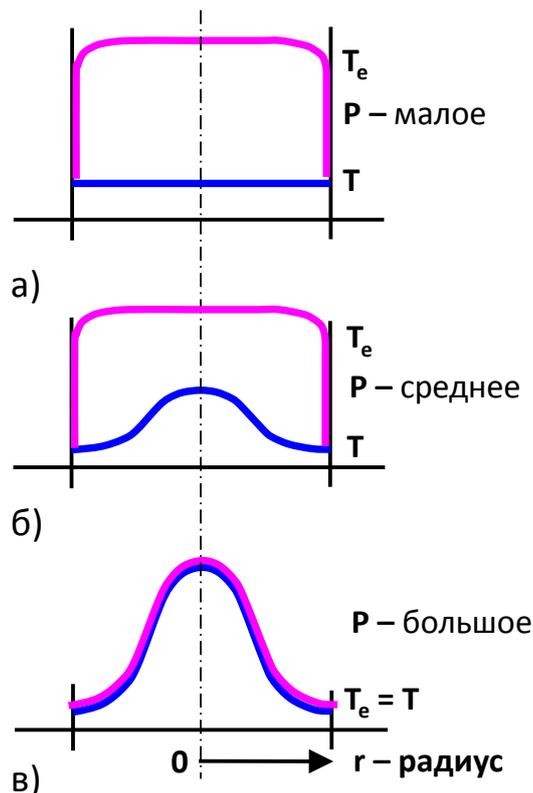


Рис. 7.2. Радиальное распределение температур T_e и T_d в столбе дуги при различных давлениях P газа

Ионная температура близка к температуре газа $T_i \approx T_d$. Движение заряженной частицы в электрическом поле равноускоренное, аналогично свободному падению тела, но сила, действующая на частицу, зависит от ее заряда, а не от массы. Уравнение сил, действующих на частицу с массой и единичным зарядом e_0 , имеет вид

$$\varepsilon \cdot E = \frac{mdv}{dt} = ma, \quad (7.1)$$

где, E – напряженность электрического поля, В/м;

m – масса частицы, г;

v – скорость частицы, м/с, a – ускорение, м/с².

При начальной скорости, равной нулю в момент t

$$v_i = \frac{e_0}{m} \cdot E \cdot t.$$

Пройденный путь за время t

$$l_i = 0,5 \cdot v_i = 0,5 \cdot \frac{e_0}{m} \cdot E \cdot t^2. \quad (7.2)$$

Скорость и пройденный частицей путь определяются ее удельным зарядом – отношением заряда к массе $\frac{e_0}{m}$. Поэтому при свободном движении частиц в одном и том же поле скорость электронов много больше скорости ионов.

Подставляя в (7.2) значение $E = \frac{U}{\ell}$, где U – разность потенциалов на пути ℓ , получим скорость электрона

$$v_e = \sqrt{\frac{e_0 \cdot U}{2 \cdot m_e}} = 2,97 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{U}. \quad (7.3)$$

Скорость иона с атомной массой M , несущего заряда, значительно меньше:

$$v_i = \sqrt{\frac{e_0 \cdot z \cdot U}{2 \cdot M \cdot M_a}} = 6,95 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{z \cdot U}{M}}$$

Здесь m_e – масса электрона; $M_a = 1822 \cdot m_e$ атомная единица массы.

Основным видом ионизации при наличии электрического поля является ударная ионизация электронов. Вышедший из катода электрон под действием градиента поля ускоряется и при столкновении с нейтральными атомами или молекулами может выбить один электрон или придать атому или молекуле некоторую скорость. Так, при движении электрона от катода к аноду произойдет ряд столкновений, в результате чего температура газ повысится. При высоком давлении и больших градиентах поля этот вид ионизации может привести к значительному повышению температуры и росту тока проводимости.

Ионы тоже участвуют в ионизации, но так как их скорости значительно меньше скоростей электронов, то роль ионной ионизации в дуговом разряде невелика. Однако при высоких температурах, когда скорость теплового движения молекул возрастает, соударения ионов и нейтральных частиц приводят к термической ионизации газа. Роль этого вида ионизации весьма значительна при высоких температурах и давлениях. Ионизация атомов излучением – фотоионизация возможна лишь в том случае, если энергия фотона $h\nu$ превышает работу ионизации

$$h\nu = \frac{C}{\lambda} \geq A_H.$$

где: ν – частота излучения, h – постоянная Планка $h = 6,62 \times 10^{-34}$ джс; C – скорость света, м/с; λ – длина световой волны, м.

Одновременно с процессом ионизации происходит деионизация – рекомбинация положительных и отрицательных частиц и диффузия их за пределы ионизированного объема газа. Между этими процессами в стационарных условиях существует равновесие, характеризуемое степенью ионизации χ , определяемой отношением числа ионов и электронов к полному числу нейтральных атомов в единице объема. Зависимость степени ионизации от температуры, давления и рода газа, описывается уравнением Саха:

$$\frac{\chi^2}{1 - \chi^2} \cdot p = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot T^{2,5} \cdot e^{\frac{e_0 U_H}{k \cdot T}} = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot T^{2,5} \cdot e^{\frac{-11600 \cdot U_H}{T}},$$

где: p – давление; T – температура; $e_0 U_H$, – работа ионизации, Дж; k – постоянная Больцмана $k = 1,38 \times 10^{-23}$, Дж/К.

Из уравнения Саха следует, что термическая ионизация становится заметной при температуре, превышающей 2000...3000 К, и приближается к 100 %-ной при 10000...30000 К. Степень ионизации особенно высока при содержании в га-

зовой среде паров металлов с низкой работой выхода электронов (щелочные металлы).

Уравнение процесса деионизации атома, потерявшего один электрон A^+ , запишем в виде

$$A^+ + e = A^0 + \Delta W,$$

где: A^0 – нейтральный атом; ΔW – количество теплоты, выделяющееся в результате этой реакции, равное энергии ионизации

$$\Delta W = e_0 \cdot U_{и.}$$

Процесс деионизации зависит от давления и температуры, и в некоторой степени определяется коэффициентом рекомбинации

$$\alpha = G_{const} \cdot \frac{P}{T^{3,5}}.$$

Откуда следует, что с повышением давления и понижением температуры плазма быстро деионизируется и теряет электропроводность, превращаясь в нейтральный газ. Процесс деионизации ускоряется диффузией заряженных частиц из нагретых плазменных объемов. Коэффициент диффузии

$$D = \lambda v / 3,$$

где: v – средняя скорость движения заряженных частиц, м/с; λ – длина свободного пробега, м.

Скорость диффузии ионов невелика. Электроны диффундируют значительно быстрее. Обычно количество существующих зарядов разного знака, вследствие процесса ионизации и рекомбинации в объеме плазмы, примерно одинаково и суммарный заряд плазмы равен нулю. Такую плазму называют квазинейтральной, т.е. почти нейтральной.

Существует понятие равновесной и неравновесной плазмы. Плазму называют равновесной в том случае, если температуры ее компонентов молекул, атомов, ионов и электронов – одинаковы. Такую плазму еще называют изотермической.

Неравновесной или неизотермической называют плазму, у которой температуры компонентов различны. Отсутствие равновесия может наблюдаться при низких давлениях, а также в сильных электрических полях. Это случай, когда средняя скорость электронов превышает среднюю скорость других частиц, что и соответствует их повышенной температуре.

По внешнему признаку и особенностям электрические разряды в газах очень разнообразны, поэтому их подразделяют на самостоятельные и несамостоятельные.

В самостоятельных разрядах заряженные частицы в разрядном промежутке образуются за счет энергии источника тока. Для поддержания несамостоятельного заряда необходимо воздействие внешних факторов, обеспечивающих ионизацию газов. Дуговой разряд характеризуется высокой плотностью тока в канале разряда (порядка $10^2 \dots 10^6$ А/см²), низким катодным падением напряжения (менее 20 В), высокой температурой газовой среды в межэлектродном пространстве, достигающей в зависимости от условий существования дуги величины порядка $(3 \dots 10) \cdot 10^3$ К и выше.

В электрической цепи, состоящей из проводниковых материалов, передача электрической энергии осуществляется электронами. В цепи с включенным проводником второго рода, прохождение электрического тока сопровождается протеканием сложных явлений, в процессе которых электроны превращаются в носители электрических зарядов другого вида, а затем снова в электроны.

Для обеспечения прохождения тока по цепи, в которую включена электрическая дуга, электрон должен покинуть электрод-катод, для чего ему необходимо преодолеть силы притяжения к атому, а затем войти в анод.

Чтобы электрон вышел из катода, ему необходимо преодолеть силу статического взаимодействия с электронной оболочкой атома и потенциальный барьер электрода, т.е. совершить работу выхода. Для различных веществ она не одинакова. Так, для алюминия она составляет 2,8; вольфрама 4,5; железа 4,77 эВ.

Работа выхода электронов для металла меньше энергии его ионизации. Чтобы вывести электрон из металла, необходимо повысить его энергию. Это достигается наложением мощного электрического поля (автоэлектронная эмиссия) или повышением температуры электрода (термоэлектронная эмиссия).

Разогрев электродов в самостоятельном разряде осуществляется за счет бомбардирования поверхности электрода ионами. Эмиссию электронов катода в результате его разогрева называют термоэлектронной эмиссией. Плотность тока термоэлектронной эмиссии зависит от температуры и материала катода и определяется по формуле:

$$j_{TЭ} = A_1 \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{B_1}{T}}, \quad (7.4)$$

где: $j_{TЭ}$ – плотность тока термоэлектронной эмиссии, $A/\text{см}^2$, $A_1 = A/\text{см}^2$, $B_1 = K$ – постоянные коэффициенты, зависящие от материала электродов; T – температура поверхности электрода K . Величины A_1 и B_1 равны соответственно для углерода 5,03 и 45700, для вольфрама 60,2 и 52700.

С увеличением температуры ток эмиссии быстро возрастает. Так, для вольфрамового катода в вакууме плотность тока термоэлектронной эмиссии при 1500 K составляет $10^{-7} A/\text{см}^2$ а при 3500 K она возрастает до $220 A/\text{см}^2$

На холодных электродах при напряженности электрического поля у электродов $10^6 \dots 10^7$ В/см возникает автоэлектронная эмиссия (выравнивание электронов электрическим полем), плотность тока которой определяется эмпирическим выражением

$$j_{ав} = A_2 \cdot E^2 \cdot e^{-\frac{B_2}{E}}, \quad (7.5)$$

где: E – напряженность электрического поля у поверхности электрода, В/см, A_2 , B_2 – постоянные для данного материала.

Формула (7.5) аналогична (7.4) и свидетельствует о большой зависимости плотности тока автоэлектронной эмиссии от напряженности поля.

При температурах до 1000 К ток эмиссии слабо зависит от температуры. При более высоких температурах начинает появляться термоэлектронная эмиссия. В этом случае суммарная плотность тока с поверхности электрода

$$j = A \cdot (T^2 + c \cdot E^2) \cdot e^{-\frac{B}{T-c \cdot E}}, \quad (7.6)$$

где, $A = 120,4 \frac{A}{\text{см}^2 \cdot K^2}$ для чистых металлов.

Для повышения тока эмиссии и снижения работы выхода электронов в электродный материал вводят активирующие добавки в виде щелочных или редкоземельных металлов, а также их оксидов. Например, ионизирующими добавками для вольфрама служат лантан, иттрий, а для углерода цезий, литий, калий, натрий, кальций.

При расстоянии между электродами более 3...4 мм вдоль дугового промежутка существует определенное распределение потенциала (рис. 7.3).

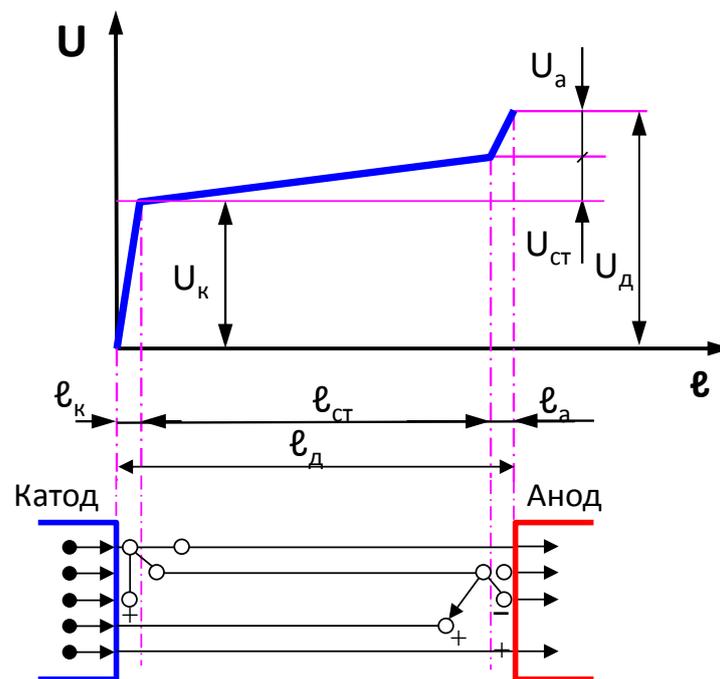


Рис. 7.3. Распределение потенциала и носителей электричества вдоль канала столба дуги

В межэлектродном промежутке четко выделяются три основные зоны: область катодного падения напряжения (8...15 В), область положительного дугового столба с напряжением от нескольких вольт до нескольких киловольт в зависимости от длины и условий горения дуги; область анодного падения напряжения (5...2 В).

Протяженность катодной и анодной областей составляет порядка по 10^{-6} м. Полное падение напряжения между электродами,

$$U_d = U_a + U_k + E\ell_d \quad (7.7)$$

где: U_a и U_k – анодное и катодное падение потенциала, В; E – напряженность электрического столба дуги В/м, ℓ_d – длина дуги, м.

Характеристика приэлектродных областей и протекающих в них процессов. Применительно к электродуговой сварке изучение протекающих в приэлектродных областях и на электродах процессов и их закономерностей преследует две цели:

- выявление закономерностей переноса теплоты и материала электрода при электродуговой сварке, плазменно-дуговой и плазменной сварке и резке металлов, переплаве металлов в дуговых печах;
- создание тугоплавких нерасходуемых или малорасходуемых электродов для электродуговой сварке неплавящимся электродом, плазматронов и т.д.

Контакт электрической дуги с электродами происходит в активных пятнах дуги (анодном и катодном), которые различаются проходящими в них явлениями и элементарными процессами.

Из прикатодного участка плазмы ионы движутся к катоду и разогревают его за счет передачи ему энергии нейтрализации и собственной кинетической энергии. Таким образом, у поверхности катода образуется положительный электрический заряд, а у поверхности анода – отрицательный. При прохождении заряженных частиц – электронов и ионов – через эти пространственные заряды образуется анодное и катодное падение потенциалов. Выделяющаяся на аноде мощность

$$Q_a = I_d \cdot (U_a + \varphi), \quad (7.8)$$

где: I_d – ток дуги, А; U_a – анодное падение напряжения, В; φ – работа выхода электронов, эВ;

Анодное падение потенциала зависит от материала анода, температуры его плавления (повышается с ростом последней) и силы тока.

Выделяющаяся на катоде мощность

$$Q_k = I_d (U_k - \varphi), \quad (7.9)$$

где, U_k – катодное падение потенциала, В.

Для катодов работу выхода электрона φ берут со знаком «–», так как электрон, покидающий катод, уносит с собой энергию и катод охлаждается.

Плотность тока в электродных пятнах зависят и от материала электрода. Например, на вольфрамовом и угольном электроде плотность тока в катодном пятке $j_k = (3 \dots 5) \cdot 10^3$ А/см² легкоплавких металлических катодов $j_k = 10^4 \dots 10^5$ А/см². В анодных пятнах для тугоплавких электродов $j_a = (1 \dots 6) \cdot 10^2$ А/см², а для легкоплавких $j_a = 10^3 \dots 10^4$ А/см².

Энергию, поступающую в электрод, можно представить состоящей из следующих компонентов:

- внутреннего источника ($I^2 R t$ – джоулева тепла, выделяющегося на границе электрода с плазмой);
- внешнего источника, связанного с приходом электрических зарядов на электрод;
- излучения плазмы дуги;
- конвективного нагрева окружающим газом;
- теплоты от экзотермических реакций материала электродов с окружающими газами.

На рис. 7.4 показаны линии тока, по которым электрический ток проходит из электрода в столб дуги.

Сварочные процессы и оборудование

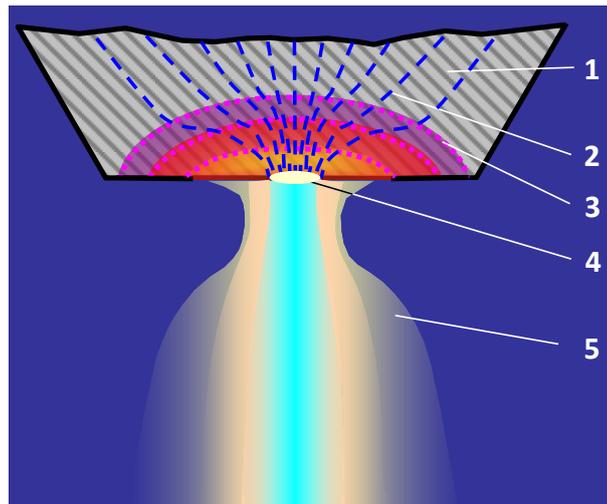


Рис.7.4. Схема линий тока на границе «дуговой столб – электрод»

Область, в которой концентрируются токовые линии, расположена непосредственно под электродным пятном и характеризуется повышенной плотностью тока. Мощность объемного источника энергии в этом случае

$$P_v = 0,48 \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \right)^{\frac{T^2}{\sigma}},$$

где: r – радиус пятна, м; σ – проводимость материала электрода, $\frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$.

Энергия внешнего источника теплоты обусловлена мощностью, выделяющейся в приэлектродных областях. Для определения этих величин пользуются формулами (7.8) и (7.9).

Мощность излучения определяется по формуле радиационного теплопереноса

$$Q = C_s \times \varepsilon (T/100)^4,$$

где: C_s – постоянный коэффициент излучения абсолютно чёрного тела, ε – степень черноты.

Выделение теплоты за счет конвективного теплопереноса наблюдается в том случае, когда высокотемпературный газ обтекает электрод.

Теплота, обусловленная прохождением на электродах экзотермических, реакций, зависит от химической активности системы «плазма – материал – электрода».

Отвод энергии от дуги осуществляется следующим образом:

1. За счет теплопроводности в тело электрода.
2. В результате уноса теплоты при испарении и разбрызгивании металла электрода.
3. В результате уноса энергии электронами, которые эмитируют разогретые поверхности электродов. Вышедшие из электрода частицы обладают определенной энергией, которую они уносят с собой:

$$\Delta W_k = \varphi \cdot I_e \quad \Delta W_a = \varphi \cdot I_i,$$

где: φ – работа выхода; I_e , и I_i – электронный и ионный ток соответственно.

4. За счет отвода теплоты от электродов излучением вследствие того, что электродные пятна имеют высокую температуру.

Основные закономерности столба электрической дуги. Ток дуги и основные характеристики плазмы дугового столба, определяющие его электропроводность, связаны соотношением:

$$I = \pi r_d^2 n_e e_0 v_e, \quad (7.10)$$

где: r_d – радиус столба дуги, м; n_e – концентрация электронов, $\frac{1}{\text{м}^3}$; e_0 – заряд электрона, Кл; v_e – средняя скорость движения электрона вдоль электрического поля, м/с.

Все физические величины, входящие в уравнение (7.10), не являются постоянными при изменении любой другой из них. Это является причиной нелинейности вольтамперной характеристики дуги (рис. 7.7) и сильно затрудняет теоретический расчет ее параметров.

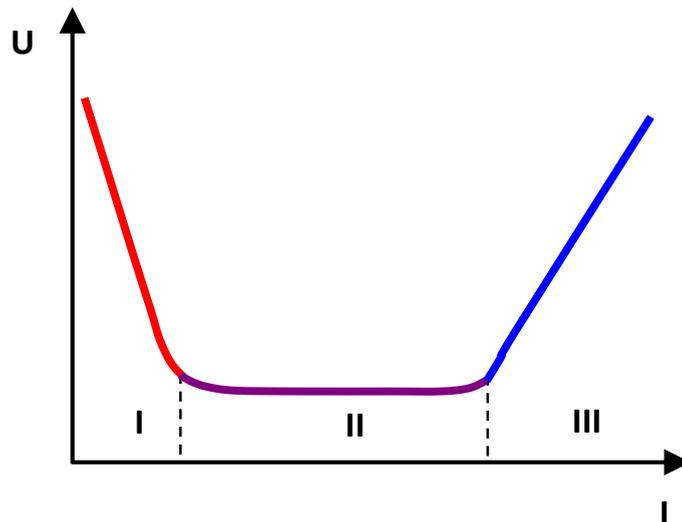


Рис. 7.7. Вольтамперная характеристика электрической дуги

Причиной падения характеристики на участке I является снижение сопротивления дуги при увеличении тока за счет роста температуры, концентрации заряженных частиц и скорости их движения. При этом с ростом тока увеличивается диаметр столба дуги и требуется меньшее напряжение на проведение увеличивающегося тока. Проходящий через разряд электрический ток создает магнитное поле вокруг столба дуги. Взаимодействие тока дуги и магнитного поля приводит к появлению сил магнитного сжатия дугового столба – электродинамические силы или пинч-эффект, которые стремятся сжать столб и ограничить диаметр дугового столба. Это способствует росту плотности тока и повышению напряженности электрического поля.

Проводимость σ в столбе электрической дуги является сложной функцией температуры, состава газа и других факторов. Для ее определения пользуются формулой

$$\sigma = n_e \cdot e_0 \cdot \mu_e = \frac{0,81 \cdot n_e \cdot e_0^2}{\sqrt{3 \cdot k \cdot T \cdot m_e \cdot \sum n_s \cdot Q_{es}}}, \quad (7.11)$$

где: k – постоянная Больцмана; m_e – масса электрона; Q_{es} – сечение столкновения электрона с частицами компоненты s .

В реальных условиях в сильноточных дугах температура свободно горящей дуги T_d составляет $(7,5...12,5) \cdot 10^3$ К. При таких температурах проводимость σ определяется в основном кулоновским взаимодействием частиц и является примерно постоянной величиной (участок II, рис. 7.7). С ростом тока возрастает магнитное сжатие, что приводит к уменьшению диаметра столба дуги. Это определяет повышение напряженности на дуге (участок III, рис. 7.7).

Большое практическое значение имеет взаимодействие дугового столба с внешним магнитным полем. Так как дуга представляет собой проводник с током, то при наложении на него поперечного магнитного поля появляется сила Лоренца F , воздействующая на дугу:

$$F = e_0 \cdot \left(E + \frac{I}{c} \right) \cdot I_d \cdot H, \quad (7,12)$$

где: c – скорость света; e_0 – заряд электрона; E, H – напряженности электрического и магнитного полей соответственно; I_d – ток дуги.

Под действием этой силы столб дуги интенсивно перемещается в межэлектродном пространстве.

С ростом напряжённости магнитного поля и тока дуги увеличивается скорость её движения, интенсифицируется теплообмен столба дуги с окружающей средой. Это приводит к изменению положения вольтамперной характеристики электродугового разряда.

Температура по сечению столба дуги распределяется не равномерно. Она имеет максимум на оси столба и понижается к его периферии (рис. 7.8).

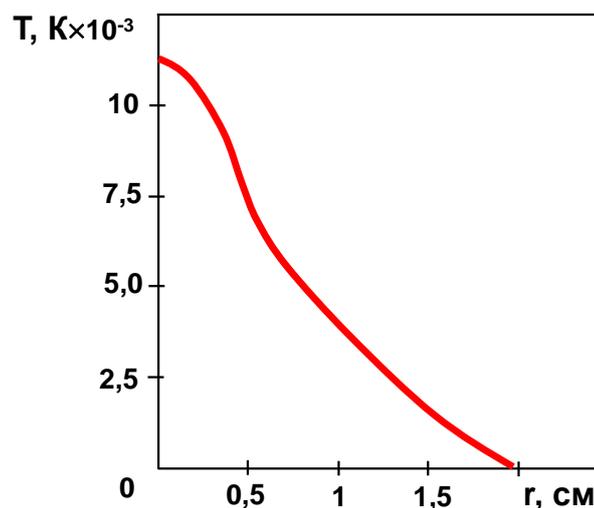


Рис. 7.8. Распределение температуры по радиусу столба дуги

Интенсивное внешнее охлаждение дуги приводит к значительному повышению плотности тока и температуры в разрядном канале. Так для свободно горящей сильноточной дуги плотность тока в столбе составляет около 10^2 А/ см². Стабилизированная водяным вихревым потоком дуга (дуга Гердиена) имеет плот-

ность тока порядка $5 \cdot 10^4$ А/ см² и температуру порядка $70 \cdot 10^3$ К. Поэтому, для получения высоких температур необходимо принимать меры по ограничению размеров проводящей зоны столба дуги и увеличению плотности тока в ней.

7.2 СПОСОБЫ ЗАЖИГАНИЯ ДУГИ

Зажигание (возбуждение) дуги и установление процесса является важной технологической операцией, оказывающей влияние на качество начальных участков швов, расход сварочных материалов и электроэнергии, особенно при выполнении коротких и прерывистых швов и дуговой точечной сварке. Эти операции важны при выполнении сварки на поточно-механизированных линиях, роботами и роботизированными системами, а также для синхронизации работы многоголовочных автоматов.

Процесс дуговой сварки условно разделяют на три стадии: начало, стабильное течение процесса и его окончание. Обычно под началом процесса понимают время установления стабильного процесса сварки, включающее зажигание дуги и переход к заданным параметрам режима.

Признаком установления стабильного процесса при сварке длинной дугой является непрерывность горения дуги на заданном режиме, а при сварке короткой дугой (с частыми периодическими замыканиями дугового промежутка) – непрерывность тока и периодичность процесса.

Все существующие способы зажигания дуги могут быть сведены к трем основным группам: размыканием контактов или разрывом перемычки в цепи с током; электрическим пробоем газового или вакуумного промежутка; переходом какого-либо маломощного электрического разряда в дуговой.

Примером способа зажигания дуги в последней группе может служить переход тлеющего разряда в дуговой.

Известно, что существование дуги как самостоятельного разряда возможно лишь при токе, превышающем некоторое минимальную величину. Поэтому зажиганию дуги всегда предшествует маломощный электрический разряд в газах типа низковольтного импульсного, искрового или тлеющего разряда.

Для процессов дуговой сварки различают контактные и бесконтактные способы зажигания дуги. К контактными способам относятся размыкание контактов в цепи с током, а к бесконтактным – электрический пробой межэлектродного промежутка.

Существующие бесконтактные способы зажигания дуги применяют преимущественно для сварки неплавящимся и покрытым электродом. Эти способы осуществляют при непрерывном сближении электродов путем ионизации и электрического пробоя межэлектродного промежутка: подачей на межэлектродный промежуток импульсов напряжения амплитудой 100...300 В с помощью генераторов импульсов; искровым разрядом, создаваемым источником высокочастотного высоковольтного напряжения – осциллятором; вспомогательной дугой, которая, как правило, зажигается осциллятором; ионизирующим излучением.

Перечисленным бесконтактным способам зажигания дуги присущи недостатки: радиопомехи по сети и эфиру; повышенные требования к надежности изоляции; повышенная опасность для обслуживающего персонала.

Контактные способы зажигания дуги применяют как при сварке электродами большого диаметра путем предварительного закорачивания электрода с последующим его отрывом от основного металла или применения легкоплавких вставок и других промежуточных проводящих материалов, так и при сварке электродами малого диаметра (2,5 мм и меньше) непрерывной подачей электрода к основному металлу до их соприкосновения.

Все контактные способы зажигания дуги основаны на разрыве контакта между электродами или перегорании электрода на участке вылета. При этом создаются благоприятные условия для зажигания дуги: высокая температура контактных участков электродов или участка вылета в месте его перегорания и высокая напряженность электрического поля, обусловленная малым межэлектродным расстоянием, образующимся при разрыве цепи, и возникающей при этом ЭДС самоиндукции. Все это обуславливает гарантированное зажигание дуги во всех случаях, аналогично повторному зажиганию дуги в пределах каждого цикла при сварке короткой дугой. В последнем случае благодаря наличию перемычки расплавленного металла между электродом и сварочной ванной значительно облегчаются условия разрыва цепи. Он происходит при токе меньше установившегося тока короткого замыкания и не сопровождается выбросом участков вылета электрода.

Однако при контактных способах начальное зажигание дуги не является достаточным условием установления процесса сварки (особенно тонкими электродными проволоками), которое носит, как правило, циклический характер. В этом случае стабильный процесс устанавливается после нескольких относительно длительных замыканий электрода, при которых ток короткого замыкания в большинстве случаев достигает установившегося значения. Каждое такое замыкание электрода с основным металлом характеризуется разогревом вылета электрода проходящим током, перегоранием и выбросом отрезков электродной проволоки, возникновением и погасанием дуги. Возможно несколько таких циклов до установления процесса. Поэтому основное значение для начала сварки при контактных способах зажигания дуги имеет не собственно зажигание дуги, а установление процесса.

Сокращение и стабилизация времени установления процесса при контактных способах зажигания дуги достигаются:

- путем подготовки конца электрода заточкой или действием магнитного поля, препятствующего образованию крупной капли;
- программным уменьшением напряжения в период окончания процесса сварки;
- программным изменением напряжения и тока процесса;
- программным изменением скорости подачи электрода; изменением параметров сварочной цепи путем уменьшения её индуктивности и активного сопротивления.

Известны также комбинированные способы, ускоряющие установление процесса, сочетающие, например, программирование скорости движения электрода с изменением электрических параметров сварочной цепи, уменьшением каплеобразования и др.

При сварке в защитных газах плавящимся электродом наибольшее практическое значение имеет установление процесса для электродных проволок диаметром до 2,5 мм. В этом случае устойчивый процесс сварки начинается после второго или большего числа замыканий электрода с основным металлом

Для улучшения начального зажигания дуги, в первую очередь, для снижения склонности электрода к «примерзанию», некоторые сварочные выпрямители с инверторными преобразователями снабжаются функцией «Горячий Старт». Она работает по следующему принципу. При первом касании торцом электрода изделия происходит включение специальной схемы управления, которая на короткое время (0,5...1,5 с) повышает ток сварки на 20...50 % от заданного уровня. Указанное время «Горячего Старта» необходимо для ускоренного формирования на торце электрода характерной втулки, после образования которой расплавленный металл сварочной ванны и жидкий металл на торце электродного стержня будут надежно защищены газовой защитой, образующейся из расплавляемого покрытия электрода

Благодаря «Горячему Старту» происходит более интенсивный (более быстрый) разогрев торца электрода и ускоренное формирование сварочной ванны. Последнее благоприятно сказывается на формировании начального участка шва, так как снижается выпуклость шва (наплыв металла), а также повышается глубина проплавления. Благодаря повышенному току сварки происходит также измельчение капель расплавленного электродного металла, что снижает склонность электрода к «примерзанию», вероятность которых очень высока при начальном зажигании, когда торец электрода еще недостаточно разогрет, а сварочная ванна еще не сформирована. В этих условиях из-за повышенного теплоотвода в основной металл и в стержень электрода капля жидкого металла при перетекании в сварочную ванну может преждевременно закристаллизоваться и вызвать «примерзание» электрода.

Для сварки неплавящимся электродом некоторые источники питания снабжаются системами «Холодный Старт». В этом случае при касании электродом изделия включается система, которая ограничивает ток короткого замыкания и чрезмерный разогрев торца электрода. В этом случае электрод легко отрывается без примерзания. При отрыве электрода зажигается малоамперная дуга, которая через 1...2 секунды переходит в ток процесса сварки.

7.3 ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Электродуговая сварка является одним из ведущих технологических процессов в машиностроении и строительной индустрии. Электрической дуговой сваркой называют процесс получения неразъемных соединений деталей из различных материалов за счет их сплавления с помощью электрической дуги.

Тепловая энергия, необходимая для плавления металла при дуговой сварке, получается в результате дугового разряда, создаваемого между свариваемыми деталями и электродом. Расплавляясь под действием активных пятен (анодного или катодного) дуги, кромки свариваемых деталей и торец плавящегося электрода образуют сварочную ванну, которая находится в расплавленном состоянии. По мере перемещения дуги вдоль свариваемых кромок расплавленный металл хвостовой части сварочной ванны остывает и кристаллизуется, образуя неразъемное соединение. Сварка плавлением представляет собой комплекс металлургических и физико-химических процессов, протекающих в металле при высоких температурах и значительной концентрации тепловой энергии в течение относительно короткого времени.

Для обеспечения необходимых металлургических процессов в сварочной ванне и защите расплавленного металла от окружающей среды при ручной дуговой сварке на плавящийся электрод наносится предварительно специальное покрытие, а при механизированной сварке в зону горения дуги подается специальный флюс или защитный газ. В процессе горения дуги вместе с плавлением металла электрода плавится электродное покрытие или флюс.

Расплавленный металл электрода переходит в сварочную ванну в виде капель. Размер капель и их количество во времени зависят от величины тока, химического состава электрода и покрытия (флюса или защитного газа), электромагнитных явлений в дуге и т.п. При переходе капель расплавленного электродного металла и покрытия через дуговой промежуток между металлом, покрытием (флюсом), шлаком и газами, окружающими дугу, протекают химические реакции.

Обычно шлаки состоят из оксидов SiO_2 , TiO_2 , P_2O_5 , CaO , MnO , FeO , BaO , MgO , NiO и т.п. и солей различных веществ CaS , MnS , CaF_2 и др. Шлак, окружающий капли металла при переходе их через дуговой промежуток, и шлаковый слой на сварочной ванне улучшает свойства наплавленного металла. Присутствующие в шлаке легко ионизирующие элементы повышают устойчивость горения дуги, что особенно важно при сварке на переменном токе.

Входящие в состав покрытия электродов газообразующие элементы (крахмал, декстрин, целлюлоза, древесная мука, мел, мрамор, соединения, богатые содержанием кислорода, например, Fe_2O_3 , MnO , плавиковый шпат) при попадании в дугу разлагаются, образуя газообразные вещества, защищающий сварочную ванну от воздействия воздуха.

При сварке в среде защитных газов защитное действие обеспечивается применением как инертных (аргон, гелий), активных (азот, углекислый газ, пары воды), так и их смесей.

При плавлении электрода на нем образуется расплавленный металл, который формируется в каплю. По мере роста капли силы поверхностного натяжения не могут удержать ее на торце электрода и капля под действием силы тяжести начинает перемещаться, вытягиваясь в сторону сварочной ванны (при сварке в нижнем положении). Если капля, вытягиваясь, замыкается с металлом сварочной ванны, то она шунтирует дугу и последняя гаснет, но электрическая цепь не разрывается. Это приводит к возрастанию тока и электродинамических сил. Под дей-

ствием электродинамических сил создается радиальная и аксиальная составляющие, которые передевливают и разрывают шейку капли. Такой процесс сварки называют процесс сварки короткой дугой. Если капля вытягивается с образованием шейки, то плотность тока в ней резко возрастает и шейка быстро перегревается и перегорает. В этом случае отсутствует замыкание дугового промежутка, а процесс сварки называют сварка длинной дугой.

Капельный перенос металла с электрода в сварочную ванну обеспечивает поступление металла до 80...97 %, остальные 20...3 % идут на потери в виде разбрызгивания из-за пространственной неустойчивости сварочной дуги и на испарение (выгорание отдельных элементов).

Количество расплавленного за единицу времени металла определяют по эмпирической формуле

$$G = \alpha_{\text{п}} \cdot I_{\text{д}} \cdot t, \quad (7.13)$$

где: $\alpha_{\text{п}}$ – коэффициент расплавления электрода, $\frac{\text{г}}{\text{А} \cdot \text{ч}}$; $I_{\text{д}}$ – ток дуги, А; t – время, ч.

Вследствие потерь расплавленного металла на угар и разбрызгивание количество фактического наплавленного металла оценивают коэффициентом наплавки $\alpha_{\text{н}}$, который на 3-20 % меньше коэффициента расплавления. Величина $\alpha_{\text{н}}$ для большинства марок электродов с различными покрытиями составляет 7...13 $\frac{\text{г}}{\text{А} \cdot \text{ч}}$.

Величина коэффициента наплавки важна при нормировании сварочных работ. Скорость сварки $V_{\text{св}} \left(\frac{\text{см}}{\text{ч}} \right)$ можно определить по формуле (7.14)

$$V_{\text{св}} = \frac{\alpha_{\text{н}} \cdot I_{\text{д}}}{\gamma \cdot F}, \quad (7.14)$$

где: $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент наплавки $\frac{\text{г}}{\text{А} \cdot \text{ч}}$; γ – удельная масса наплавляемого металла $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$; F – площадь поперечного сечения сварного шва, см^2 .

Длина дугового промежутка при сварке без замыканий дугового промежутка должна быть больше длины капли и составляет 3...5 мм. Напряжение на сварочной дуге зависит от способа сварки, химического состава и диаметра электрода, состава свариваемого материала, защитной среды, тока процесса и составляет 18...45 В и описывается уравнением (7.7). При дуговой сварке $U_{\text{а}} = 2...12$ В, $U_{\text{к}} = 8...17$ В, а градиент потенциала столба дуги $E = 0,5...6,0$ В/мм.

Интенсивность плавления электрода и кромок свариваемого металла определяется преимущественно мощностью, выделяемой в активных пятнах дуги на электроде и изделии, а столб дуги выполняет в основном технологические, а не энергетические функции. Поэтому главным энергетическим показателем установок дуговой сварки является величина сварочного тока. Напряжение на дуге обеспечивает поддержание необходимой длины дугового промежутка и оказывает влияние на ширину сварочной ванны. А величина напряжения холостого хода сварочного источника питания обеспечивает устойчивое горение дуги. Напряжение холостого хода источника питания для падающего и жесткого участка вольт-

амперной характеристики дуги должно быть $U_{xx} = (1,4 \dots 2,2) U_d$. Для источников питания с круто падающей внешней характеристикой $U_{xx} = 55 \dots 80$ В. Это напряжение обеспечивают сварочные источники питания. Необходимо отметить, что напряжение сварочных источников питания безопасно для человека. Это обусловило широкое развитие и применение ручной дуговой сварки штучными электродами.

По степени механизации различают сварку ручную, механизированную и автоматическую. Отнесение процесса к тому или иному виду зависит от того, каким образом выполняются: зажигание и поддержание определенной длины дуги, манипуляции электродом для придания шву заданной формы, перемещение электрода по линии наложения шва и прекращение процесса сварки. При ручной дуговой сварке операции, необходимые для образования шва, выполняются рабочим – сварщиком вручную. Ручная сварка производится плавящимся электродом с покрытием, (рис.7.9, а) или неплавящимся электродом с газовой защитой (инертной или активной) и введения присадочного материала (рис.7.9, б).

При сварке плавящимся электродом дуга горит между основным металлом и металлическим стержнем заданного химического состава, подаваемым в зону дуги по мере его плавления (рис.7.9, а). В состав шва входит расплавленный основной металл и металл плавящегося электрода – электродный металл, а в некоторых случаях и еще присадочный металл, который подают в сварочную ванну. В качестве плавящегося электрода используют сварочную (электродную) проволоку круглого сечения, порошковую проволоку, электродную ленту, специальные электроды более сложной формы. Питание дуги осуществляют от источников переменного или постоянного тока при прямой или обратной полярности.

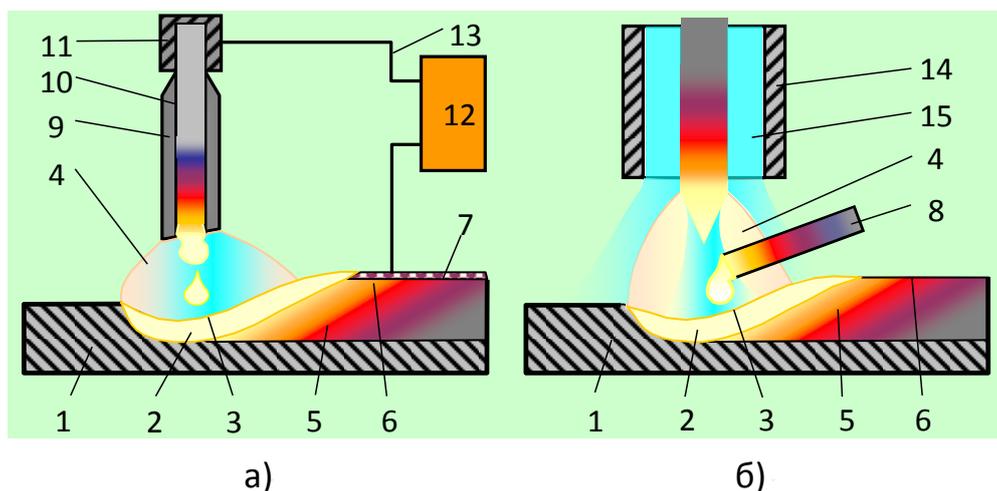


Рис. 7.9. Ручная дуговая сварка покрытым (а) и неплавящимся (б) электродом: 1 – основной металл; 2 – сварочная ванна; 3 – кратер; 4 – сварочная дуга, 5 – расплавленный металл; 6 – наплавленный металл; 7 – шлаковая корка; 8 – присадочный материал; 9 – покрытие электрода; 10 – стержень электрода; 11 – электрододержатель; 12 – источник питания; 13 – токоподвод; 14 – сопло; 15 – защитный газ

При сварке покрытым электродом (рис. 7.9, *а*) расплавляющееся по мере плавления стержня 10 покрытие 9, в зависимости от состава образует газовую защиту 4 от атмосферного воздуха или газшлаковую изолирующую зону дуги и сварочную ванну. По мере перемещения дуги вдоль свариваемых кромок происходит остывание и кристаллизация металла сварочной ванны 2 и формирование шва 6. Расплавившееся покрытие всплывает на поверхность, и после остывания образует шлаковую корку 7.

Сварку неплавящимся электродом (вольфрам, уголь) осуществляют дугой прямого (рис. 7.9, *б*) и косвенного действия (рис. 7.10). Шов образуется за счет плавления основного металла (рис. 7.10) или основного и присадочного металлов (рис. 7.9, *б*). Материал электрода не участвует в образовании шва, КПД дуги прямого действия достигает 0,3...0,4, КПД дуги косвенного действия – 0,2...0,3.

При сварке угольным электродом питание дуги осуществляется от источника постоянного тока. При токе прямой полярности электрод соединен с отрицательным, а основной металл с положительным полюсом источника питания.

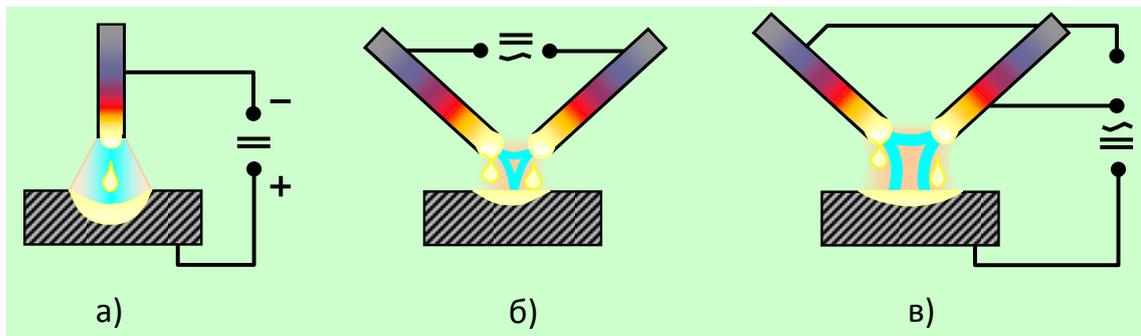


Рис. 7.10. Типы сварочных дуг неплавящимся электродом: *а* – дуга прямого действия на постоянном токе прямой полярности; *б* – дуга косвенного действия на постоянном и переменном однофазном токе; *в* – дуга косвенного действия трехфазная

Сварка угольным электродом током обратной полярности (когда на электроде плюс, а на основном металле – минус) не находит практического применения из-за значительного науглероживания металла шва. При сварке на токе прямой полярности науглероживание основного металла не наблюдается. Сварку вольфрамовым электродом ведут на постоянном токе при прямой полярности или на переменном токе с обязательной защитой области дуги инертным газом, предохраняющим электрод от окисления.

В зависимости от числа электродов различают сварку одним, двумя и тремя электродами. Возможна сварка и большим числом электродов. Сварка дугой прямого действия плавящимся электродом является основным видом электрической сварки плавлением, КПД дуги при этом способе достигает 0,7...0,9.

Сварку плавящимся электродом дугой прямого действия осуществляют, как правило, без дополнительного присадочного металла (рис. 7.11, *а*) реже – с дополнительным присадочным металлом в виде проволоки, ленты и т. д, который подают в зону сварки в ручную или механизмом подачи. (рис. 7.11, *б*).

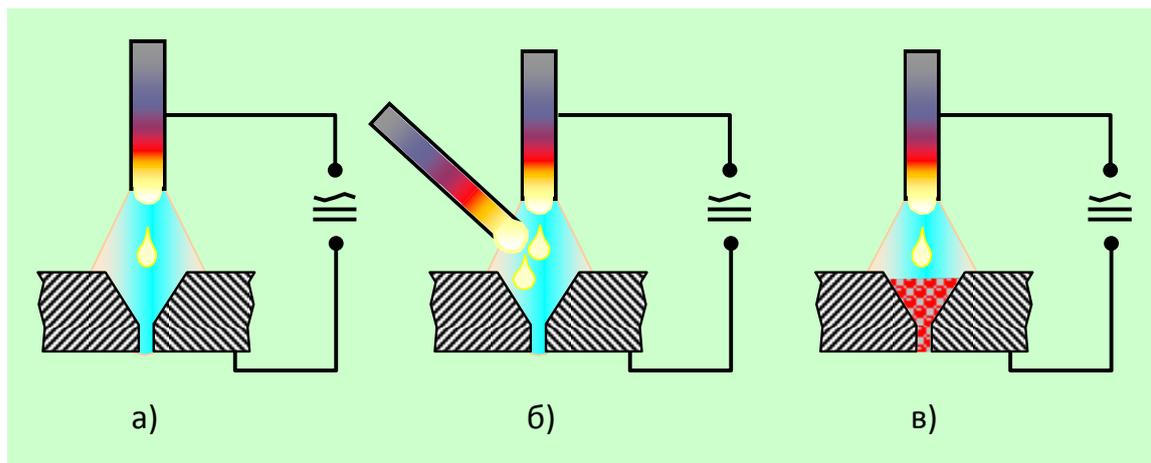


Рис. 7.11. Сварка дугой прямого действия плавящимся электродом на постоянном или переменном токе: *а* – без дополнительного присадочного металла; *б* – с дополнительным присадочным металлом, подаваемым в зону дуги в процессе сварке; *в* – сварка по металлической крошке

Процесс сварки состоит из ряда последовательных операций, в результате которых формируется шов. К этим операциям относятся зажигание и поддержание дугового разряда, манипуляции электродом для придания шву нужной формы и для направления электрода по оси соединения, перемещения дуги вдоль свариваемых кромок по мере формирования шва заданного сечения, прекращение процесса. В зависимости от того, производятся ли указанные операции вручную или при помощи механизмов, различают ручную, механизированную (полуавтоматическую) и автоматическую сварку.

При ручной сварке все операции, необходимые для образования шва, выполняют вручную без применения механизмов; электродами длиной 250...450 мм сварка плавящимся электродом. Для подвода тока служит специальный держатель, который в процессе сварки находится в руке сварщика.

При механизированной сварке плавящимся электродом механизирована операция подачи электрода в зону дуги, для чего применяется специальный механизм подачи электродного или присадочного металла. Манипуляции электродом, выполняемые для поддержания заданного режима, придания шву заданной формы и перемещения дуги, вдоль свариваемых кромок, осуществляют вручную или при помощи простейшего механизма, приводимого в движение от руки. Сварку производят сварочной проволокой сплошного сечения или порошковой проволокой, подаваемой из кассеты или непосредственно из бухты. Сварочная проволока от подающего механизма к держателю поступает по гибкому шлангу.

При автоматической сварке операции по зажиганию дуги и поддержанию дугового разряда осуществляются сварочной головкой, а перемещение дуги вдоль свариваемых кромок – сварочной тележкой. Оператор не принимает непосредственного участия в образовании шва, а управляет процессом сварки при помощи управляющих устройств.

Автоматическую сварку плавящимся электродом ведут в большинстве случаев сварочной проволокой сплошного сечения диаметром 1,0...6,0 мм. Проволока так же, как и при полуавтоматической сварке, подается из специальной кассеты или бухты. Возможно, применение порошковой проволоки и ленты. При автоматической сварке обеспечивается постоянство режима сварки (ток, напряжение, скорость подачи электродной проволоки, скорость сварки), что обуславливает однородность качества шва по всей его длине. Автоматическая сварка требует наличия специального оборудования и большей точности подготовки и сборки деталей под сварку, так как возможности изменения режима в процессе сварки в зависимости от колебания величины зазора, угла разделки кромок и т.п. весьма ограничены.

При дуговой сварке происходит интенсивное взаимодействие находящегося в расплавленном состоянии металла в сварочной ванне с кислородом и азотом воздуха, что приводит к изменению химического состава и ухудшению механических, коррозионных и других свойств металла шва. Поэтому возникает необходимость в защите зоны сварки от окружающего воздуха.

Широкое применение находит защита зоны сварки при помощи специального состава, наносимого на поверхность, электродной проволоки, или вводимого внутрь полого или имеющего специальную форму электрода (порошковая проволока).

При ручной дуговой сварке покрытие на металлический стержень электрода наносится до процесса сварки. Для обеспечения возможности подвода электрического тока к стержню электрода на один из его концов на длине 20-35 мм покрытие не наносят.

При автоматическом процессе широкое применение находит защита зоны сварки гранулированным покрытием – флюсом (рис. 7.12). При этом способе флюс 1 подается в зону дуги отдельно от голой электродной проволоки 2. Флюс создает главным образом шлаковую защиту.

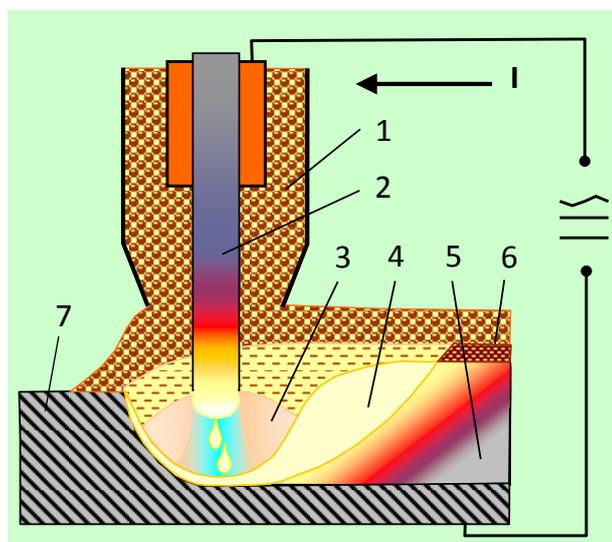


Рис. 7.12. Сварка под флюсом

Дуга горит между электродом 2 и основным металлом 7 в пузыре 3, образованном парами и газами, выделяемыми в столбе дуги. Столб дуги со всех сторон окружен слоем флюса 1 толщиной 30...50 мм. Под воздействием выделяемой дугой теплоты плавятся кромки свариваемого металла 7, электродная проволока 2 и часть флюса 1, примыкающая к зоне дуги, и образуется сварочная ванна 4. По мере перемещения дуги происходит кристаллизация сварочной ванны и формирование шва 5, соединяющего воедино свариваемые детали. Расплавленный флюс всплывает на поверхность сварочной ванны и при остывании образует шлаковую корку 6, легко отделяющуюся от шва при охлаждении. Не расплавившаяся часть флюса может быть использована повторно. Расход флюса по массе примерно равен расходу электродной проволоки.

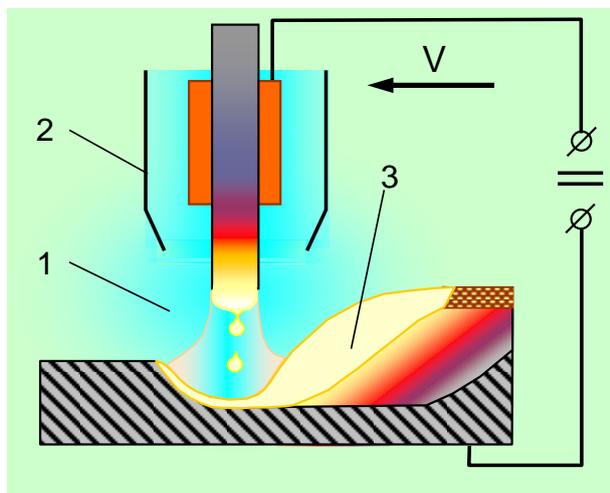


Рис 7.13. Сварка в защитном газе

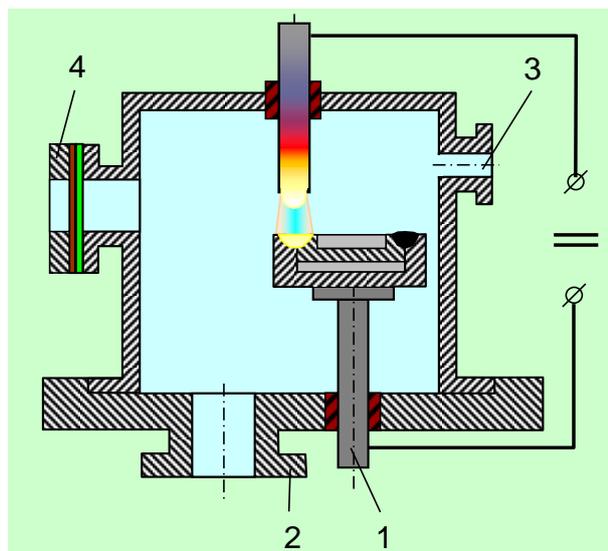


Рис. 7.14. Сварка в контролируемой атмосфере: 1 – приспособление для перемещения свариваемой детали; 2 – фланец для подсоединения воздушного насоса; 3 – канал для подачи защитного газа; 4 – смотровое окно

Роль флюса в основном сводится к защите сварочной ванны и к обеспечению заданного качества шва.

При сварке в защитных газах (рис. 7.13) дуга и сварочная ванна окружена газом 1, подаваемым под небольшим избыточным давлением из сопла 2 сварочной горелки, обычно расположенного концентрически электроду. Газовая защита применяется при сварке плавящимся и неплавящимся электродом. Роль газа сводится к физической изоляции сварочной дуги и ванны 3 от окружающего воздуха. В качестве защитной среды используются инертные и активные газы, а также смеси на их основе.

Разновидностью сварки в защитных газах является сварка в контролируемой атмосфере (рис. 7.14).

Сварка происходит в камере, где сначала создается вакуум, затем камера заполняется аргоном, гелием или смесью газов (создается контролируемая атмосфера). При этом обеспечивается более надежная защита сварочной ванны. Этот метод применяют при дуговой сварке неплавящимся электродом химически активных металлов и сплавов автоматом, полуавтоматом или вручную. В некоторых случаях сварку ведут в вакууме без создания специальной атмосферы.

7.4 ПЛАВЯЩИЕСЯ ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Общие сведения об электродах. Покрытый электрод представляет собой металлический стержень, на поверхность которого методами опрессовки под давлением нанесено специальное покрытие. В зависимости от назначения к электроду предъявляют различные требования.

Общие требования для всех типов электродов: обеспечение устойчивого горения дуги; хорошее формирование шва; получение металла шва определенного химического состава и свойств, свободного от дефектов; спокойное и равномерное плавление электродного стержня и покрытия в процессе сварки; минимальные потери электродного металла от угара и разбрызгивания; высокая производительность сварки; легкая отделимость шлаковой корки с поверхности шва; достаточная прочность покрытия; сохранение физико-химических и технологических свойств электродов в течение определенного промежутка времени; минимальная токсичность при изготовлении и сварке.

К электродам предъявляют ряд специальных требований: получение швов заданной формы (вогнутая поверхность шва, глубокий провар и др.); возможность сварки в различных пространственных положениях, возможность сварки определенным способом (сварка опиранием, сварка вертикальных швов способом сверху вниз и др.); получение металла шва со специальными свойствами (повышенной прочности, износоустойчивости, коррозионной стойкости, жаропрочности, окислительной стойкости и т. п.).

Для удовлетворения всех этих требований (общих и специальных) в покрытие электродов вводят определенные вещества – шлакообразующие, газообразующие, раскислители, легирующие, стабилизирующие, связующие, а также применяют стержни различного состава

Газообразующие составляющие вводят в электродное покрытие в виде органических веществ (оксицеллюлозы, крахмала, древесной муки, декстрина) или в виде карбонатов (мрамора, мела, известняка, доломита, магнезита, сидерита). Органические составляющие покрытия и карбонаты при нагревании разлагаются и образуют газы, которые оттесняют воздух от дугового промежутка.

На определенных этапах процесса сварки расплавленный металл контактирует со шлаком, атмосферой дуги и воздухом, в результате чего окисляется. Для получения высокого качества шва металл необходимо раскислить, т. е. восстановить находящиеся в расплаве окислы. С этой целью в покрытие вводят элементы-раскислители, чаще всего в виде ферросплавов: ферромарганца, ферросилиция, ферротитана и др. Иногда в качестве раскислителя применяют алюминий или графит. Если электроды имеют стержень из легированной стали, то раскисление частично осуществляется за счет легирующих элементов стержня.

Для получения повышенной прочности, износоустойчивости, коррозионной стойкости и многих других специальных свойств металла шва его необходимо легировать марганцем, кремнием, вольфрамом, молибденом, хромом, никелем, ниобием, бором, титаном и другими элементами. Легировать металл шва можно через проволоку или через покрытие. Возможно одновременное использование обоих

способов легирования. Наиболее стабильные химический состав, механические и другие свойства металла шва (особенно при сварке и наплавке высоколегированных сплавов) получают при легировании через проволоку.

Для стабилизации горения дуги в покрытия вводят соединения щелочных и щелочноземельных металлов (калия, натрия, кальция, бария), обладающих низкими потенциалами ионизации и малой работой выхода электронов. В качестве стабилизирующих составляющих используют силикаты натрия и калия, поташ, кальцинированную соду, полевой шпат, мел, мрамор и углекислый барий.

Для повышения пластичности обмазочной массы в состав покрытия вводят пластификаторы – бентонит, каолин, тальк, слюда, целлюлозу, карбоксиметилцеллюлозу и другие вещества.

В качестве связующих материалов при изготовлении покрытых электродов чаще всего используют натриевое, калиевое или натриево-калиевое жидкое стекло. В покрытиях некоторых электродов для связки применяют лаки и порошкообразные пластмассы. Многие составляющие покрытия выполняют одновременно несколько функций. Например, мрамор, магнезит и доломит являются и газообразующими, и шлакообразующими составляющими; полевой шпат, слюда, жидкое стекло – шлакообразующими и стабилизаторами; ферросплавы – раскислителями и легирующими. Состав покрытия выбирают в зависимости от назначения электродов и требуемых состава и свойств металла шва.

Классификация электродов. Электроды для РДС классифицируют по следующим основным признакам: по назначению - для сварки стали, чугуна, алюминия, для наплавочных работ и т.п.; по типу покрытия – целлюлозные, рутиловые, фтористо-кальциевые, ильменитовые, рудно-кислые и др.; по механическим свойствам металла шва; по количеству покрытия, нанесенного на стержень – голые электроды, тонкопокрытые, толстопокрываемые.

Все эти признаки тесно взаимосвязаны. Группы тех или иных признаков положены в основу классификации электродов в национальных стандартах различных стран. Электроды для сварки и наплавки сталей в зависимости от назначения в соответствии с ГОСТ 9466-60 подразделены на ряд классов: для сварки углеродистых и легированных конструкционных сталей; для сварки легированных теплоустойчивых сталей; для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами; для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами.

Электроды для сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей согласно ГОСТ 9467-60 классифицированы по механическим характеристикам металла шва и сварного соединения, выполненных этими электродами. Электроды для сварки теплоустойчивых сталей классифицированы, кроме того, и по химическому составу металла шва. ГОСТ 9467-60 устанавливает в зависимости от состава следующие виды покрытий электродов для сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей: рудно-кислое, обозначаемое буквой Р; рутиловое – Т; фтористо-кальциевое – Ф; органическое – О.

Электроды для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами по ГОСТ 10052-62 подразделены на ряд типов в зависимости от химического состава наплавленного металла и механических свойств металла шва. Каждому типу

может соответствовать одна или несколько марок электродов. Марка электродов характеризуется определенным составом покрытия и электродного стержня, технологическими свойствами и свойствами металла шва.

Механические свойства, регламентируемые стандартом или техническими условиями для электродов данной марки, относятся к случаю наплавки металла или сварки стыкового шва сравнительно небольшой длины. В зависимости от условий сварки механические свойства металла шва реальной сварной конструкции могут отличаться от свойств электродов, указанных в стандарте или паспорте.

Наиболее полно свойства каждой конкретной марки электродов отражены в паспорте. Паспорт содержит следующие сведения: условное обозначение электродов, их назначение, марку сварочной проволоки и данные о покрытии электродов. К последним относятся состав, номера стандартов или технических условий на составляющие покрытий, соотношение массы покрытия и массы стержня, толщина покрытия в зависимости от диаметра стержня, режимы сушки и прокалики, а также условия хранения электродов. В паспорте содержатся также краткие технологические указания по сварке, характеристики расплавления электродов, химический состав и свойства наплавленного металла, металла шва или сварного соединения.

Общие требования, предъявляемые к электродам, регламентированы ГОСТ 9466-60. Это размеры и допуски отклонений от номинальных размеров, качество покрытия, влагостойкость покрытия, требования к технологическим и металлургическим свойствам электродов. Этим же стандартом обусловлены правила приемки электродов, методы испытаний швов и сварных соединений, условия маркировки и упаковки, данные о документации на электроды. Условное обозначение электродов для дуговой сварки сталей и наплавки состоит из обозначения марки и типа электрода, диаметра стержня и номера стандарта. В условном обозначении электродов для сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей указан также вид покрытия. Например, условное обозначение электрода АНО-7 Э50А-5,0-Ф ГОСТ 9467-60 расшифровывается следующим порядком: АНО-7 – марка электрода; Э50А – тип электрода (Э – электрод для дуговой сварки, 50 – минимальное гарантируемое временное сопротивление металла шва в кгс/мм²; А – гарантирование получения повышенных пластических свойств металла шва); 5,0 – диаметр электродного стержня в мм; Ф – фтористо-кальциевое покрытие; ГОСТ 9467-60 – номер стандарта на данный электрод.

Электроды для сварки углеродистых и низколегированных сталей. Для сварки углеродистых и низколегированных сталей применяют преимущественно электроды с рудно-кислым, рутиловым, органическим и фтористо-кальциевым покрытиями. Наибольшее распространение в нашей стране получили электроды с рутиловым покрытием. Доля электродов с рутиловым покрытием в настоящее время составляет около 70 % общего выпуска электродов. Для сварки особо ответственных конструкций применяют главным образом электроды с фтористо-кальциевым покрытием. Доля отечественных электродов с органическим покрытием невелика. Эти электроды применяют главным образом при строительстве магистральных трубопроводов. Все более широкое распространение получают

высокопроизводительные электроды с железным порошком в покрытой на рутиловой и фтористо-кальциевой шлакообразующей основе. Все указанные электроды изготавливают с использованием сварочной проволоки Св-08 и Св-08А. Легирование металла шва при сварке электродами этой группы осуществляется путем введения легирующих составляющих в покрытие

Электроды со стабилизирующим покрытием. Стабилизирующее покрытие наносят на электродный стержень тонким слоем. Масса покрытия составляет обычно 1...2 % массы стержня.

Повышение устойчивости горения дуги достигается введением в состав покрытия соединений калия и натрия (хромата, бихромата, силиката, карбоната и др.), а также карбонатов кальция, магния или бария. Наличие в покрытии солей щелочных и щелочноземельных металлов приводит к уменьшению энергии, выделяемой на катоде при сварке постоянным током прямой полярности, вследствие чего резко снижается скорость плавления электрода.

Из-за больших потерь от угара и разбрызгивания, малой скорости расплавления, отсутствия возможности производить сварку на повышенных токах электроды со стабилизирующим покрытием обладают весьма низкой производительностью.

Механические свойства металла шва, сваренного электродами со стабилизирующим покрытием, низкие и практически не отличаются от свойств металла шва, сваренного голой проволокой. Вследствие этого электроды со стабилизирующим покрытием применяют чрезвычайно редко, лишь для сварки ответственных изделий.

Электроды с рудно-кислым покрытием. Шлакообразующую основу руднокислого покрытия составляют окислы железа и марганца (преимущественно в виде руд) и различные алюмосиликаты (полевой шпат, пегматит, гранит и др.). Газовая защита расплавленного металла в основном обеспечивается за счет разложения органических составляющих покрытия (оксицеллюлозы, крахмала, декстрина, древесной муки). Раскисление металла осуществляется марганцем, который вводят в покрытие в виде ферромарганца. При сварке электродами с руднокислым покрытием активно протекают реакции окисления марганца (7-7) и железа:



Реакция (7-7) приводит к обогащению жидкого металла кислородом. Большое количество теплоты, выделяющейся при окислении марганца, обеспечивает высокую скорость расплавления электрода. Основная часть марганца в ферромарганце в процессе сварки окисляется, и лишь небольшая часть переходит в металл шва. Металл, наплавленный электродами с рудно-кислым покрытием, по химическому составу чаще всего соответствует кипящей стали и содержит до 0,12 % С, до 0,10% Si, 0,6...0,9 % Mn, до 0,05 % S и до 0,05 % P. Содержание газов обычно находится в следующих пределах: 0,09...0,12 % кислорода, 0,015...0,025 % азота, 20...25 см³/100 г водорода.

Электроды с рудно-кислым покрытием позволяют производить сварку переменным и постоянным током. При нормальной толщине покрытия (коэффициент массы покрытия 30...40 %) эти электроды пригодны для сварки во всех про-

странственных положениях. При большой толщине покрытия электроды применяются только для сварки в нижнем положении.

Металл швов, выполненных электродами с рудно-кислым покрытием, склонен к образованию кристаллизационных трещин. Это обусловлено высоким содержанием в нем газов и неметаллических включений.

Шлаки, образующиеся при расплавлении рудно-кислых покрытий, обладают сравнительно небольшой способностью обессеривать металл шва. По вышеизложенным причинам электроды с рудно-кислым покрытием не рекомендуется применять для сварки сталей с повышенным содержанием серы и углерода, а также для сварки жестких конструкций, в которых могут возникать значительные напряжения.

Электроды с рудно-кислым покрытием позволяют сваривать металл с ржавыми кромками и окалиной, вести сварку удлиненной дугой и обеспечивают при этом получение плотных швов. Поры при сварке электродами этого типа могут возникать при чрезмерно высокой температуре их прокалики, при повышенном содержании марганца в покрытии, при сварке сталей с высоким содержанием кремния или серы.

Высокотемпературная прокалика рудно-кислого покрытия способствует снижению парциального давления водорода и паров воды в атмосфере дуги, а, следовательно, и снижению содержания водорода в сварочной ванне. В результате степень пересыщения металла газом уменьшается и при снижении температуры расплавленного металла процесс дегазации идет медленно. Вялое кипение не обеспечивает дегазации металла до момента кристаллизации, и в металле образуются поры.

Высокотемпературная прокалика электродов и чрезмерное раскисление марганцем способствуют развитию кремне восстановительного процесса и повышению концентрации кремния в жидком металле. Кремний, будучи поверхностно-активным элементом, адсорбируется на поверхности металла и ухудшает условия дегазации. Выделение газов при этом протекает медленно, что вызывает образование пор. Аналогичное влияние на условия дегазации металла оказывает сера, которая также обладает поверхностной активностью.

По механическим свойствам металла шва и сварного соединения электроды с рудно-кислым покрытием, как правило, относятся к типу Э42 (ГОСТ 9467-60). До недавнего времени электроды с рудно-кислым покрытием были наиболее массовыми. Наличие в покрытии большого количества окислов железа и ферромарганца при сварке этими электродами обуславливает выделение в зону дыхания сварщика большого количества токсичных соединений марганца. В связи с повышенной токсичностью объемы выпуска электродов с рудно-кислым покрытием в последние годы резко сократились. Их заменили электроды с рутиловым покрытием.

Электроды с рутиловым покрытием. Шлакообразующую основу рутиловых покрытий составляют рутиловый концентрат, различные алюмосиликаты (слюда, полевой шпат, каолин и др.) и карбонаты (мрамор, магнезит). Газовая защита расплавленного металла обеспечивается за счет разложения органических составля-

ющих покрытия, а также карбонатов. Раскисление металла осуществляется в основном марганцем, вводимым с ферромарганцем.

Известные рутиловые покрытия условно можно разделить на две подгруппы: рутилалюмосиликатные и рутилкарбонатные. Шлакообразующую основу покрытий первой подгруппы составляют рутил и различные алюмосиликаты. Содержание карбонатов в них, как правило, не превышает 5 %. Покрытия второй подгруппы содержат 10...15 % карбонатов. В рутиловых покрытиях основными окислителями являются пары воды и углекислый газ.

Важное значение имеют окислительно-восстановительные реакции марганца и кремния, в значительной мере определяющие наличие силикатных неметаллических включений в металле шва, а, следовательно, и его механические свойства. При сварке электродами с рутилкарбонатным покрытием кремневосстановительный процесс получает меньшее развитие, чем при сварке электродами с рутилалюмосиликатным покрытием. Этому способствуют более высокие основность шлака и окислительный потенциал атмосферы дуги.

С увеличением основности шлака снижается количество неметаллических включений и кислорода в металле шва, повышаются его пластические свойства и стойкость против образования кристаллизационных трещин.

Благодаря указанным факторам электроды с рутилкарбонатным покрытием обеспечивают более высокое качество металла шва, чем электроды с рутилалюмосиликатным покрытием. Рутил-карбонатные покрытия имеют отечественные электроды марок

АНО-3, АНО-4, АНО-5, АНО-12, МР-1, МР-3; рутилалюмосиликатные покрытия – электроды АНО-1, ОЗС-3, ОЗС-4, ОЗС-6, ЦМ-9.

Металл, наплавленный электродами с рутиловым покрытием, по химическому составу соответствует полуспокойной или спокойной стали и содержит до 0,12 % С; 0,5...0,8 % Мп; 0,10...0,30 % Si; до 0,05 % S и до 0,05 % P. Содержание газов в металле швов, выполненных электродами с рутиловым покрытием, обычно находится в следующих пределах: 0,05...0,10 % кислорода, 0,015...0,025 % азота, 25...30 см³/100 г водорода.

Электроды с рутиловым покрытием обладают высокими сварочно-технологическими свойствами: обеспечивают отличное формирование швов с плавным переходом к основному металлу, малые потери металла от разбрызгивания, легкую отделимость шлаковой корки, стабильное горение дуги при сварке на переменном и постоянном токе любой полярности. Металл шва, сваренного электродами с рутиловым покрытием, мало склонен к образованию пор при колебаниях длины дуги, при сварке влажного и ржавого металла, при сварке по окисленным поверхностям. Причины образования пор при сварке электродами этого типа такие же, как и при сварке электродами с рудно-кислым покрытием. Стойкость металла швов против образования кристаллизационных трещин несколько выше, чем у электродов с рудно-кислым покрытием.

В зависимости от толщины покрытия электроды могут быть предназначены для сварки либо во всех пространственных положениях, либо только в нижнем положении; от толщины покрытия зависят и технологические свойства электро-

дов. По технологическим свойствам и содержанию железного порошка в покрытии электроды условно делят на три группы.

Электроды с ильменитовым покрытием. Это покрытие получило название от минерала ильменита ($\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$). Концентрат ильменита является основной составляющей покрытия, в которое могут входить также марганцевая руда, алюмосиликаты, карбонаты, ферросплавы и органические составляющие.

К этой группе относят электроды марок ОММ-5 и СМ-5, покрытия которых иногда относят к рудно-кислому типу. Шлакообразующую основу этих покрытий составляет ильменитовый концентрат Кусинского месторождения, содержащий до 50 % окислов железа. Указанные электроды имеют ряд серьезных недостатков – повышенное разбрызгивание металла, неблагоприятные гигиенические характеристики и т. п., что обусловлено высоким содержанием окислов железа в покрытии. Использование ильменитового концентрата Саянканского месторождения, содержащего не более 30...35 % окислов железа, позволило создать новые электроды.

Низкое содержание окислов железа в покрытии позволило улучшить сварочно-технологические и гигиенические характеристики электродов и качество выполняемых ими швов. Новые электроды с ильменитовым покрытием, которым присвоена марка АНО-6, предназначены для сварки низкоуглеродистых сталей во всех пространственных положениях. Они рекомендованы для сварки в монтажные и заводские условия. По сварочно-технологическим свойствам электроды АНО-6 приближаются к электродам с рутиловым покрытием. По механическим свойствам металла шва они относятся к типу Э42 по ГОСТ 9467-60. Производительность электродов АНО-6 на 15...20 % выше, чем электродов типа ОММ-5. Они выпускаются в больших количествах и применяются в различных отраслях промышленности.

Электроды с фтористо-кальциевым покрытием. Шлакообразующую основу фтористо-кальциевого покрытия составляют плавиковый шпат (CaF_2) и карбонаты кальция и магния (мрамор, мел, магнезит). Газовая защита расплавленного металла обеспечивается за счет углекислого газа, образующегося при разложении карбонатов. Раскисление металла осуществляется марганцем, кремнием, титаном или алюминием, вводимыми в покрытие в виде соответствующих ферросплавов или металлических порошков.

Главным окислителем при сварке электродами с фтористо-кальциевым покрытием является газовая фаза. Шлаки имеют низкую концентрацию окислов железа и поэтому не играют существенной роли в окислении жидкого металла. Применение активных раскислителей (кремния, титана, алюминия) обеспечивает низкое содержание кислорода в жидком металле. Хорошая рафинирующая способность фтористо-кальциевых шлаков, обусловленная их высокой основностью и низкой вязкостью, способствует почти полному удалению из расплавленного металла продуктов раскисления.

Шлакообразующими добавками являются рутил, титановый концентрат, марганцевая руда, алюмосиликаты и карбонаты. Раскислителем служит ферромарганец. Электроды этого типа имеют, как правило, небольшую толщину по-

крытия (коэффициент массы покрытия – 15...25 %) и при сварке образуют небольшое количество шлака. Эти электроды особенно пригодны для сварки во всех пространственных положениях (на монтаже) и при недостаточно хорошей сборке конструкций. Они могут применяться при сварке постоянным и переменным током. Особенностью электродов этого типа являются очень большие (до 20 %) потери расплавленного металла от разбрызгивания. Органическое покрытие не допускает перегрева в процессе сушки и при сварке. Выгорание органических составляющих покрытия при его перегреве приводит к изменению химического состава металла шва по его длине. Металл, наплавленный электродами с органическим покрытием, по химическому составу соответствует полуспокойной или спокойной стали. Содержание газов обычно находится в следующих пределах: 0,04...0,10% кислорода, 0,01... 0,02 % азота, 25...35 см³/100 г водорода. По механическим свойствам металла шва электроды с органическим покрытием соответствуют типам Э42...Э50.

Электроды с органическим покрытием применяют в основном для сварки трубопроводов в монтажных условиях. Наибольшее распространение получили электроды ВСЦ-4 и ВСЦ-4А, специально предназначенные для сварки корневого слоя шва поворотных и неповоротных стыков трубопроводов из низкоуглеродистых и низколегированных сталей

Электроды для сварки с глубоким проваром. Покрытие электродов этого вида содержит большое количество оксицеллюлозы (5...30 %), двуокиси титана (чаще всего в виде рутила) и карбоната железа (FeCO₃); его наносят на стержень слоем большой толщины (коэффициент массы покрытия достигает 80...100 %). В качестве шлакообразующей основы часто используют покрытие рудно-кислого типа. Для электродов с глубоким проваром характерна большая втулочка из не расплавившегося покрытия на конце электрода. При нагреве органических составляющих покрытия происходит их разложение с образованием газов. Большое количество выделяемой в дуге энергии и мощный газовый поток обеспечивают глубокое проплавление металла.

Высокопроизводительные электроды. Характерной особенностью высокопроизводительных электродов является высокое содержание железного порошка в покрытии (40...60 %) и большая толщина покрытия (коэффициент массы покрытия составляет 120...180 %). Высокая производительность электродов достигается за счет дополнительного металла, содержащегося в покрытии, снижения потерь металла от разбрызгивания и более высоких допустимых сварочных токов.

Плавление покрытия высокопроизводительных электродов сопровождается образованием на торце электрода глубокой втулочки не оплавившегося покрытия, которая, экранируя столб дуги, увеличивает его длину и мощность. В результате мощность столба дуги, роль которого в плавлении тонко покрытых электродов невелика, оказывает существенное влияние на скорость плавления и на производительность электродов с железным порошком в покрытии и большим коэффициентом массы покрытия. Коэффициент наплавки высокопроизводительных электродов с железным порошком составляет в зависимости от диаметра стержня, режима сварки и коэффициента массы покрытия 12...20 г/А·ч. В электродах неко-

торых марок масса наплавленного металла в 1,5...2 раза превышает массу электродного стержня. В качестве шлакообразующей основы высокопроизводительных электродов используют покрытия рудно-кислого, фтористо-кальциевого или рутилового типов. В России наибольшее распространение получили высокопроизводительные электроды с рутиловым покрытием АНО-1 и АНО-10. Для сварки высокопроизводительными электродами зачастую необходимы источники питания с повышенным напряжением холостого хода. По механическим свойствам металла шва и сварного соединения высокопроизводительные электроды чаще всего соответствуют типу Э42 – Э50 (рутиловая или рудно-кислая шлакообразующая основа) и Э50А (фтористо-кальциевая шлакообразующая основа). Их рекомендуется применять для сварки в заводских условиях.

Электроды для сварки вертикальных швов способом сверху вниз. Ручную дуговую сварку вертикальных швов выполняют, как правило, способом снизу-вверх. Сила сварочного тока обычно не превышает 140...160 А, что вызвано необходимостью ограничения объема и жидкотекучести сварочной ванны. Возможности электрода при этом используются не полностью, производительность сварки снижается. Способ сварки сверху вниз позволяет значительно повысить силу тока и производительность (рис. 7.15).

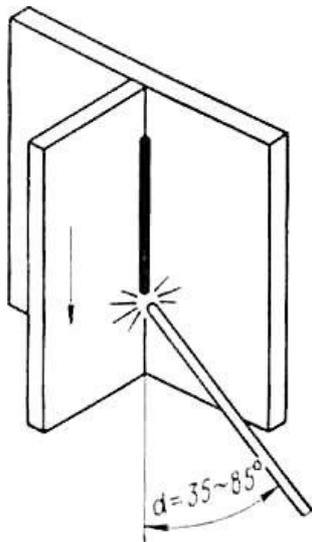


Рис. 7.15. Схема сварки вертикальных швов способом сверху – вниз

Для сварки способом сверху вниз необходимо обеспечить такие физико-химические свойства шлака и металла (вязкость, межфазное натяжение на границе раздела шлак - металл и др.), которые способствовали бы малой жидкотекучести сварочной ванны, хорошему формированию металла шва, получению необходимого провара. К этой группе относятся электроды марки АНО-9 (тип Э50А-Ф). Они рекомендуются специально для высокопроизводительной сварки способом сверху вниз угловых, нахлесточных и стыковых соединений, находящихся на вертикальной плоскости. При этом обеспечиваются отличное формирование металла шва, незначительные потери металла от разбрызгивания и самопроизвольное отделение шлаковой корки. Провар умеренный. Линейная скорость сварки однопроходных швов электродами

АНО-9 в 1,8...2 раза, а многопроходных в 1,2...1,3 раза больше, чем скорость сварки однотипных швов способом снизу-вверх электродами типа Э50А-Ф.

Электроды для сварки вертикальных швов способом сверху-вниз применяются в судостроении, вагоностроении и других отраслях промышленности.

Электроды для сварки легированных сталей. Электроды для сварки легированных теплоустойчивых сталей подразделены в соответствии с ГОСТ 9467-60 на семь типов, отличающихся механическими свойствами после термообработки и химическим составом металла шва. Электроды этой группы имеют обычно фто-

ристо-кальциевое покрытие. Исключение составляют электроды ЦЛ-6 и ЦЛ-14, которые имеют рудно-кислые покрытия. Легирование металла шва осуществляется как через покрытие, так и через стержень.

В связи с наличием структурных превращений и закалочных явлений в основном металле сварку электродами этой группы, как правило, следует выполнять с предварительным и сопутствующим подогревом изделий. После сварки необходима термообработка сварных соединений или изделия в целом, чаще всего в виде высокотемпературного отпуска, а иногда нормализации с отпуском.

Электроды для сварки среднелегированных высокопрочных сталей. Особенностью сварки сталей этой группы является большая склонность швов и сварных соединений к образованию кристаллизационных и холодных трещин, а также к хрупкому разрушению. Для сварки высокопрочных сталей используют электроды аустенитного и ферритного классов. Электроды аустенитного класса применяют для сварки сталей в закаленном состоянии без подогрева и последующей термообработки. Они позволяют свести к минимуму опасность образования трещин при сварке. Электроды ферритного класса служат для сварки высокопрочных сталей с подогревом и в сочетании с последующей термообработкой обеспечивают высокую конструктивную прочность сварных изделий.

Все электродные покрытия для сварки высокопрочных сталей относятся к фтористо-кальциевому типу. Это связано с весьма высокими требованиями к чистоте металла шва по содержанию водорода и неметаллических включений. Покрытие наносят на стержни, изготовленные из легированной или высоколегированной стали. Химический состав стержней определяется требованиями к составу и структуре металла шва.

Для исключения опасного влияния водорода на склонность металла шва и околошовной зоны к образованию холодных трещин и хрупкому разрушению металлоконструкций электроды перед сваркой высокопрочных сталей должны быть подвергать прокатке при температуре около 400 °С в течение 1...2 ч.

Электроды для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами. Высоколегированные стали широко применяют в производстве оборудования для химического и энергетического машиностроения и других отраслей техники. Разнообразие свойств высоколегированных сталей определяет области их применения. Эти стали классифицируют в зависимости от основного применения на коррозионностойкие (нержавеющие), жароупорные (окалин стойкие) и жаропрочные.

Металл швов высоколегированных сталей склонен к образованию горячих и холодных трещин. Поэтому для сварки таких сталей применяют электроды с фтористо-кальциевым покрытием. Они обеспечивают легирование наплавленного металла хромом или хромом с никелем. Для раскисления металла сварочной ванны, а также для снижения окисления хрома в покрытие вводят активные раскислители – ферросилиций, ферротитан или алюминий. Для дополнительного легирования металла шва в состав покрытия вводят различные ферросплавы или металлические порошки – хром, марганец, алюминий, молибден.

Для электродов, предназначенных для сварки в потолочном и вертикальном положениях в состав покрытия вводят небольшое количество двуокиси титана для измельчения капель электродного металла.

Сварку электродами этой группы ведут постоянным током обратной полярности.

Электроды с органическим покрытием. Покрытия органического типа содержат большое количество органических составляющих, разлагающихся в процессе плавления электрода и обеспечивающих газовую защиту расплавленного металла.

7.5 СВАРОЧНЫЕ ФЛЮСЫ

Флюсы применяют при многих способах сварки и наплавки плавлением при электродуговой сварке под флюсом, сварке по флюсу, сварке с магнитным флюсом и при электрошлаковой сварке. В процессе сварки флюс защищает зону сварки от доступа воздуха и выполняет ряд других важных функций. Флюсы можно классифицировать по следующим основным признакам: назначению, способу изготовления, химическому составу, строению и размеру частиц.

Современные флюсы в зависимости от их назначения и преимущественного применения разделяются на флюсы, предназначенные для дуговой и электрошлаковой сварки и для наплавки; флюсы, предназначенные для механизированной сварки и наплавки углеродистых сталей, легированных сталей и цветных металлов, и сплавов. Такое разделение в известной степени условное, поскольку флюсы, преимущественно применяемые для сварки и наплавки одной группы металлов или сплавов, могут быть с успехом использованы для сварки и наплавки металлов другой группы. Вместе с тем флюсы, предназначенные для сварки одних цветных металлов или легированных сталей одних марок, могут оказаться непригодными для сварки других цветных металлов или легированных сталей других марок.

Различают флюсы общего назначения и специальные. Флюсы общего назначения предназначены для механизированной дуговой сварки и наплавки углеродистых и низколегированных сталей углеродистой и низколегированной сварочной проволокой. Флюсы специальные предназначены для отдельных способов и целей сварки: электрошлаковой сварки, сварки легированных сталей и т. п.

По способу изготовления флюсы разделяют на плавленные и не плавленные. Плавленные флюсы получают сплавлением компонентов шихты в электрических или пламенных печах. Не плавленные флюсы изготавливают скреплением частиц флюсовой шихты без их сплавления. К числу не плавленных флюсов относятся керамические флюсы, спеченные флюсы, флюсы-смеси.

Керамические флюсы изготавливают из смесей порошкообразных материалов, скрепляемых при помощи клеящих веществ, главным образом жидким стеклом. Спеченные флюсы изготавливают спеканием компонентов шихты при повышенных температурах без их сплавления. Полученные комки затем измельчают до частиц требуемого размера. Флюсы-смеси изготавливают механическим смешением кру-

пинок 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 механические смеси не имеют постоянных составов и технологических свойств и недостаточно надежно обеспечивают стабильное качество сварных швов.

По химическому составу сварочные флюсы делятся на три группы: оксидные, солевые и солеоксидные. Оксидные флюсы состоят из окислов металлов и могут содержать до 10 % фтористых соединений. Их преимущественно применяют для сварки углеродистых и низколегированных сталей. Флюсы солевого типа состоят из фтористых и хлористых солей металлов, а также из других, не содержащих кислород химических соединений. Их применяют для сварки активных металлов, таких как алюминий, титан и др., а также для электрошлакового переплава. Флюсы солеоксидного типа состоят из фторидов и окислов металлов. Их преимущественно применяют при сварке и наплавке высоколегированных сталей.

По химическому составу шлакообразующей части оксидные флюсы могут быть разделены на кислые, нейтральные и основные. Это определяется содержанием в их составе кислых и основных окислов. К кислым (кислотообразующим) оксидам относят SiO_2 и TiO_2 , к основным – CaO , MgO , MnO , FeO . Окись алюминия Al_2O_3 и окись железа Fe_2O_3 имеют амфотерный характер. Если в составе флюса много кислого оксида SiO_2 , Al_2O_3 ведет себя как основной окисел, если же флюс содержит много основных окислов, Al_2O_3 ведет себя как кислый окисел. Фториды и хлориды относятся к химически нейтральным соединениям.

Плавленные флюсы в зависимости от содержания в них SiO_2 разделяют на высококремнистые, низко кремнистые и бескремнистые. К высококремнистым относятся флюсы, содержащие свыше 37...40 % SiO_2 . При меньшем содержании SiO_2 флюсы относятся к низко кремнистым. В бескремнистых флюсах SiO_2 содержится только в качестве примеси (не более 4 %). Флюсы, предназначенные для сварки низкоуглеродистой и низколегированной, стали низкоуглеродистой проволокой, как правило, высококремнистые. Низкокремнистые флюсы обычно применяют для сварки легированных сталей.

По содержанию MnO плавленные флюсы разделяют на безмарганцевые и марганцевые. К первым относятся флюсы, содержащие не более 1 % MnO . При более высоком содержании MnO флюс относится к марганцевым.

По строению частиц плавленные флюсы разделяют на стекловидные, пемзовидные и кристаллические. Стекловидный флюс представляет собой прозрачные зерна. Они бесцветные или же окрашены в зависимости от состава в различные цвета – от светло-синего до черного. Пемзовидный флюс представляет собой зерна пенистого материала белого или светлых оттенков желтого, зеленого и других цветов. Кристаллический флюс характеризуется кристаллическим строением зерен, окрашенных в те же цвета, что и пемзовидный флюс. Объемная масса пемзовидных флюсов 0,6...1 г/см³, стекловидных и кристаллических 1,4...1,8 г/см³, промежуточную объемную массу имеют флюсы полупемзовидного строения.

Определяющими при выборе флюса являются состав основного металла и принятый способ сварки.

Флюсы для дуговой сварки углеродистых конструкционных сталей.

Для сварки углеродистых сталей следует применять флюсы, удовлетворяющие основным требованиям: обеспечение устойчивости процесса сварки; отсутствие кристаллизационных трещин и пор в шве; обеспечение требуемых механических свойств металла шва и сварного соединения в целом; хорошее формирование шва; легкая отделимость шлаковой корки; минимальное выделение вредных газов при сварке; низкая стоимость флюса и возможность промышленного изготовления.

Флюсы для сварки и наплавки легированных сталей. Большинство требований, предъявляемых к флюсам для сварки углеродистых сталей, действительны и для флюсов, предназначенных для сварки легированных сталей. Дополнительное требование - минимальное окисление легирующих элементов, вводимых в шов из основного металла и сварочной проволоки. Имеют место также трудности в обеспечении хорошей отделимости шлака с поверхности швов, содержащих ванадий или ниобий, а также хром.

Отделимость шлаковой корки зависит от окисляющего действия жидкого флюса на поверхность затвердевшего шва. Длительность этого действия очень невелика и составляет для обычных режимов электродуговой сварки 20 - 30 с. Жидкий шлак, содержащий значительные количества FeO , MnO , SiO_2 и TiO_2 , окисляет поверхность затвердевшего металла шва. Образующаяся весьма тонкая окисная пленка прочно удерживается на его поверхности. Если поверхность металла окислена, а в составе шлака находятся соединения, прочно сцепляющиеся с окисной пленкой на шве (Al_2O_3 , Cr_2O_3 и др.), следует ожидать прочного удерживания шлака на поверхности металла.

Введение в сварочную ванну небольших количеств сильных раскислителей значительно улучшает отделимость шлака. Прочность удерживания шлака возрастает при содержании в нем заметных количеств окислов ванадия, ниобия, хрома и алюминия, что приводит к образованию в ближайшем ко шву слое шлака соединений, имеющих такую кристаллическую решетку, которая дотраивает решетку закиси железа. Для улучшения отделимости шлаковой корки с поверхности шва следует принимать меры, затрудняющие образование и рост окисной пленки.

Выполнение требований, предъявляемых к флюсу как в отношении минимального окисления примесей, так и легкой отделимости шлака, обеспечивается применением флюсов с низким содержанием окислов железа, марганца, кремния и титана, т. е. с пониженными окислительными свойствами.

Снижение содержания SiO_2 во флюсе для автоматической и полуавтоматической дуговой сварки с целью уменьшения окисляющего действия ухудшает его формирующие свойства. При сварке под флюсом качество формирования швов остается удовлетворительным, если уменьшение содержания SiO_2 во флюсе компенсируется соответствующим повышением содержания Al_2O_3 , способного подобно SiO_2 придавать флюсу вязкость, делать его «длинным». Поэтому в составе флюсов для сварки легированных сталей обычно много окиси алюминия, причем ее концентрация тем выше, чем меньше содержание SiO_2 .

Плавленные флюсы для сварки и наплавки легированных сталей. Флюсы АН-20С, АН-20СМ и АН-20П имеют одинаковый химический состав и отли-

чаются лишь по размеру и строению зерен. Эти флюсы предназначены для дуговой автоматической наплавки легированных сталей и сварки легированных сталей соответствующими сварочными проволоками.

Флюс АН-22 предназначен для электрошлаковой сварки и дуговой автоматической сварки и наплавки легированной сварочной проволокой; флюсы АН-26С, АН-26П и АН-26СП – для автоматической и полуавтоматической сварки нержавеющей, коррозионностойких и жаропрочных сталей соответствующими сварочными проволоками. Индекс СП указывает, что флюс состоит из зерен стекловидного и пемзовидного строения. При надлежащем выборе технологии низкокремнистые флюсы перечисленных выше марок можно применять для сварки и наплавки иных типов стали в сочетании с соответствующими сварочными проволоками.

Из силикатов, алюминатов и алюмосиликатов магнезия состоит флюс 48-ОФ-10. В его составе много CaF_2 . Флюс предназначен для дуговой наплавки лентой и сварки легированных и низколегированных сталей. Для наплавки легированных сталей и чугуна предназначен флюс АН-28. Суммарное содержание SiO_2 и Al_2O_3 в нем составляет 43...53 %, CaO и CaF_2 47...53 %. Флюс имеет пемзовидное строение и цвет от белого до темно-серого. Высокие стабилизирующие свойства флюса АН-28 позволяют надежно вести наплавку не только проволокой, но и широкой лентой. Для сварки легированных сталей предназначен и флюс АВ-5.

Установлено, что введение в состав низкокремнистых флюсов окислов железа способствует значительному улучшению механических свойств металла шва. С этой целью разработаны флюсы АН-17, АН-17М и другие, имеющие стекловидное строение и черный цвет.

Разработка составов низкокремнистых флюсов за рубежом вызвана необходимостью при сварке углеродистых сталей уменьшить окисление вводимого с проволокой марганца. Высококремнистые безмарганцевые флюсы типа UM20 или UM30, содержащие около 50% SiO_2 , вследствие развития кремневосстановительного процесса значительно уменьшают содержание марганца в металле сварочной ванны.

Хотя окислительное действие низкокремнистых флюсов, особенно не содержащих окислов марганца, на металл сварочной ванны невелико, все же оно достаточно, чтобы полностью или в значительной степени окислить и перевести в шлак такие элементы, как титан, алюминий, цирконий и др. Недостатком этих флюсов является также плохая отделимость шлака от поверхности швов, содержащих ванадий и ниобий, вследствие окисления поверхности шва жидким шлаком. Низкокремнистые флюсы мало пригодны для получения стабильноаустенитных швов и сварки высоконикелевых жаропрочных сплавов ввиду недопустимо высокой окислительной способности, загрязнения металла шва неметаллическими силикатными включениями и значительного перехода кремния в шов.

Перечисленные недостатки низкокремнистых флюсов вызвали необходимость разработки и применения бескремнистых, безмарганцевых флюсов, не содержащих в своем составе SiO_2 , MnO и других непрочных окислов или же содержащих их только в качестве загрязняющей примеси. Бескремнистые флюсы со-

стоят из таких прочных окислов, как Al_2O_3 , CaO и MgO , а также из фторидов щелочных и щелочноземельных металлов.

Флюс 48-ОФ-6 применяют при автоматической дуговой сварке и наплавке легированных сталей. Состоящий из фтористого кальция и прочных окислов, он мало влияет на химический состав металла шва. Гранулированный по мокрому способу флюс 48-ОФ-6 с целью возможно более полного удаления из него влаги обязательно прокачивают при высокой температуре.

Для автоматической дуговой наплавки легированных сталей предназначены флюсы АН-30 и АН-70. Флюс АН-30 имеет стекловидное строение зерен, флюс АН-70 – пемзовидное. К бескремнистым относятся флюсы АНФ-6 и АНФ-7, нашедшие преимущественное применение при электрошлаковом переплаве. Зерна этих флюсов имеют камневидное строение.

Плавленные флюсы для сварки высоколегированных сталей и сплавов. Для сварки высоколегированных сталей и сплавов преимущественно применяют флюсы с высоким содержанием фтористых соединений (фторидные флюсы). По химическому составу они относятся к солевому или солеоксидному типам. Кроме того, для сварки высоколегированных сталей и сплавов находят применение низкокремнистые флюсы и так называемые высокоосновные флюсы.

Сварку высоколегированных сталей под низкокремнистыми, бескремнистыми и фторидными флюсами, как правило, ведут на постоянном токе обратной полярности. Сварка на переменном токе дает отрицательные результаты как в отношении устойчивости дугового процесса, так и в отношении качества получаемых швов.

В зависимости от характера воздействия на металл сварочной ванны фторидные флюсы подразделяют на бескислородные, без окислительные и окислительные.

Основой фторидных бескислородных флюсов (АНФ-1П, АНФ-5, АНФ-24) является фтористый кальций, в качестве добавок используются фториды натрия (АНФ-5), магния (АНФ-24), бария и др. При сварке достигается высокое усвоение таких легирующих элементов, как титан, алюминий, бор, так как бескислородные флюсы их почти не окисляют. Кроме того, снижается содержание серы в металле шва. Вместе с тем эти флюсы не лишены технологических недостатков: ухудшенное формирование сварных швов и способность шунтировать дугу расплавленным шлаком, в результате чего нарушается устойчивость дугового процесса. Бескислородные флюсы применяют преимущественно для сварки аустенитными швами сталей и сплавов, содержащих легкоокисляющиеся элементы.

Фторидные безокислительные флюсы (АНФ-7, АНФ-8, АНФ-23) имеют фторидную основу (до 50 %) и содержат некоторое количество прочных окислов, например, CaO , MgO или Al_2O_3 . Введение этих окислов продиктовано в основном стремлением улучшить формирующие свойства фторидных флюсов. Безокислительные фторидные флюсы рекомендуется применять для сварки аустенитных швов.

Фторидные окислительные флюсы также имеют фторидную основу, но содержат наряду с прочными окислами такие непрочные кислородные соединения,

как окислы марганца (флюсы АНФ-15, АНФ-17), окись бора (флюс АНФ-22). Флюс АНФ-17 предназначен для сварки чистоаустенитных швов, не содержащих титана, алюминия и бора, флюс АНФ-22 – для сварки аустенитно-боридных швов.

Сварка под фторидными окислительными флюсами, содержащими окислы марганца и бора, сопровождается окислением кремния, серы, фосфора и легированием металла шва марганцем и бором. Марганец и бор (при содержании более 0,2 %) положительно влияют на стойкость чистоаустенитных швов против образования кристаллизационных трещин. Естественно, что при этом наблюдается значительный угар титана и алюминия. Чтобы компенсировать потерю этих элементов и связанное с этим снижение прочности металла шва, используют сварочные проволоки, дополнительно легированные ниобием, молибденом и вольфрамом.

Интенсивность окислительно-восстановительных процессов при сварке под фторидными окислительными флюсами увеличивается с ростом напряжения дуги и уменьшением величины сварочного тока.

Фторидные окислительные флюсы АНФ-14, АНФ-16 и АНФ-25 (система $\text{CaP}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{SO}_2$) рекомендуют для сварки аустенитно-ферритных швов и швов на хромистых коррозионностойких сталях. Для тех же сталей применяют низкокремнистые флюсы 48-ОФ-10 и АН-26. Низкокремнистые окислительные флюсы пригодны также и для сварки аустенитных сталей. Так, хорошие результаты получены при сварке стабильноаустенитной стали ЭИ943 и других под флюсом АН-18, содержащим окислы железа.

К высокоосновным относятся окисные флюсы на основе устойчивых окислов CaO , MgO , Al_2O_3 . Они могут содержать также некоторое количество фторидов (флюс АН-29). Высокоосновные флюсы сочетают в себе хорошие металлургические и технологические свойства. Их особенность состоит в том, что во избежание образования пор сварку под ними необходимо выполнять на постоянном токе прямой полярности, тогда как при использовании фторидных и низкокремнистых флюсов.

Керамические флюсы для сварки углеродистых сталей. Приоритет разработки керамических флюсов принадлежит Советскому Союзу. Впервые керамические флюсы для дуговой сварки предложил К.К. Хренов.

Каждое зерно керамического флюса состоит из прочно соединенных мелких частичек и содержит все компоненты флюса в определенном соотношении. Зерна флюса имеют одинаковый химический состав, плотность и строение. Благодаря этому исключена возможность разделения составляющих частей керамического флюса при его использовании. Отсутствие операции плавления при изготовлении флюсов этого типа позволяет вводить в их состав минералы, руды, ферросплавы, металлы, углеродистые вещества и другие материалы независимо от их взаимной растворимости, что значительно эффективнее влияет на состав и структуру металла шва.

При сварке под плавленными высококремнистыми марганцевыми флюсами металл шва легируется только кремнием и марганцем. С помощью керамических

флюсов металл шва можно легировать и другими элементами, причем в большом количестве.

Для сварки углеродистых конструкционных сталей нашли достаточно широкое применение лишь керамические флюсы на основе марганцевой руды и песка. Состав шихты для изготовления флюсов этой группы подобен составу шихты таких плавящихся флюсов, как ОСЦ-45, АН-348-А и др. В качестве примера рассмотрим флюсы К-11 и КВС-19.

Зерна флюсов К-11 и КВС-19 черного цвета. Эти флюсы обладают хорошими технологическими свойствами. Они обеспечивают нормальное формирование швов, легкую отделимость шлаковой корки с поверхности шва и достаточно высокую стойкость швов против образования кристаллизационных трещин. Механические свойства сварных швов и соединений, выполненных под флюсами К-11 и КВС-19 на углеродистой стали, несколько уступают таковым, сваренным под плавящимися флюсами АН-348-А и ОСЦ-45, вследствие повышенного содержания в них фосфора. Вместе с тем флюсы К-11 и КВС-19 значительно превосходят плавящиеся флюсы АН-348-А и ОСЦ-45 по стойкости швов против образования пор. Им равноценен в этом отношении только плавящийся пемзовидный флюс АН-60.

7.6 НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ СВАРКИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

Для сварки неплавящимся электродом используются тугоплавкие металлы из графита и материалов на его основе вольфрам, молибден, тантал и др., используя их способность выдерживать большие тепловые потоки и обеспечивать высокий уровень плотности тока термоэлектронной эмиссии.

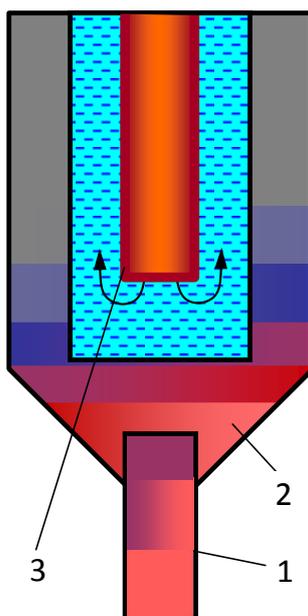


Рис. 7.16. Конструкция катодного узла плазматрона

На рис. 7.16 показан вольфрамовый катод, выполненный в виде вольфрамового стержня 1, выступающего на несколько миллиметров из охлаждаемого наконечника 2 с трубкой 3 водохлаждающей системы. Этот катод предназначен для работы в электродуговых нагревателях газа при токах до 100...2000 А в среде аргона, водорода и азота, исключающих присутствие кислорода.

Легкоплавкие электроды используются в технологических процессах с расходующимися электродами (электродуговая сварка, переплав металлов и их сплавов в вакуумных дуговых печах и др.) и в процессах с нерасходуемыми электродами (нагрев газов в плазматронах).

Для увеличения срока службы нерасходуемых электродов предусмотрено быстрое перемещение активного пятна дуги по их поверхности.

сти. Это достигается воздействием на дугу внешних магнитных полей или механическим перемещением электрода.

Термохимические катоды. При горении дуги в активных газах на поверхности электрода возможно образование соединений, существенно влияющих на электрофизические свойства электродов: работу выхода, плотность тока эмиссии, температуру поверхности.

Термохимическим катодом называют электрод, активная зона которого образуется при взаимодействии материала электрода с окружающим газом, расходуется во время работы и регенерируется по мере разрушения.

Лантаноиды (цирконий, гафний и др.) образуют соединения, сохраняющиеся при довольно высоких температурах, и являются высокоэффективными электродами. Они наиболее перспективны для создания термохимических катодов. При горении дуги на поверхности электрода (цирконий, гафний или лантан) на катоде в присутствии кислорода образуются оксиды металлов, которые характеризуются более высокой температурой плавления, чем у исходных металлов. Так, если температура плавления циркония около 2500 К, то диоксид циркония плавится при температуре около 4800 К.

Электрическое сопротивление диоксида циркония с повышением температуры снижается с $1 \cdot 10^4$ Ом·м при температуре 700 К до 0,1 Ом·м при температуре 2300 К. Катодное пятно на цирконии или гафнии, покрытых слоем оксидов, не перемещается и представляет собой концентрированную тепловую нагрузку. Температура максимальна в центре катодного пятна и резко спадает к его периферии.

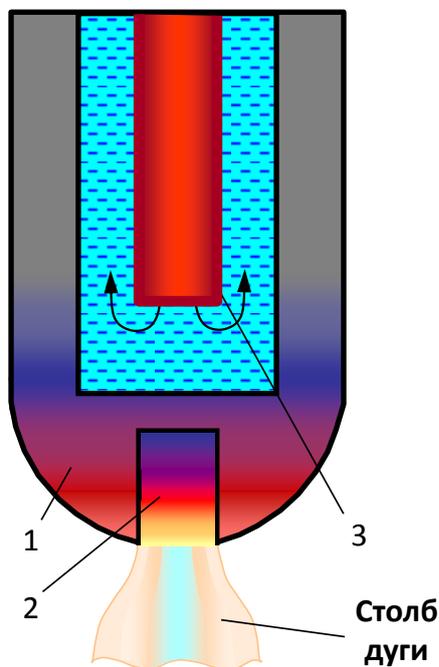


Рис. 7.17. Термохимический катод

С понижением температуры уменьшатся проводимость активного слоя электрода, тем самым положение пятна дуги стабилизируется расплавленными и твердыми слоями соединений на электроде. Вследствие низкой теплопроводности материала ограничивается значение действующего в пятне теплового потока (около 0,8 кВт для циркония и 1,5...2,0 кВт для гафния). Стабилизация катодного пятна на электроде из циркония способствует понижению величины работы выхода электронов. Так, работа выхода циркония составляет 4,4...4,7 эВ, а работа выхода образующейся пленки диоксида циркония – 2,3 эВ.

Термохимический катод (рис. 7.17) не может работать без взаимодействия с окружающей средой. Он представляет собой массивную втулку 1 в которую запрессована активная вставка из циркония или гафния 2. Во втулку 1 введена трубка 3 с интенсивно циркулирующей охлаждающей жидкостью. При работе на токах, когда пятно дуги занимает 75...85 % площади активной вставки, образующаяся лунка окружена пленкой соединений, предотвраща-

ющей контакт дуги с медной втулкой. При переходе дуги на медную втулку вследствие роста тока дуги втулка отжигается, что приводит к нарушению теплового контакта в системе оболочка (втулка) – активная вставка и электрод выходит из строя. Допустимая плотность тока на цирконии составляет $50 \dots 60 \frac{A}{мм^2}$.

Способы зажигания дуги. В промышленных установках применяют следующие способы зажигания дуги (возбуждения дугового разряда): импульсное касание электродов; взрыв проводника малого сечения – проволоочки; высокочастотный высоковольтный пробой дугового промежутка.

Контрольные вопросы

1. Что такое плазма.
2. В чём заключается процесс ионизации и деионизации.
3. Что такое автоэлектронная и термоэлектронная эмиссия.
4. Какую геометрическую форму имеет вольтамперная характеристика электрической дуги и с чем это связано.
5. Укажите способы зажигания дуги и чем они определяются.
6. Что такое холодный старт и целесообразность его применения.
7. Что такое горячий старт и целесообразность его применения.
8. Какие материалы применяются в качестве неплавящихся электродов.
9. Что представляют собой плавящиеся электроды для ручной дуговой сварки.
10. Что обозначает тип электрода.
11. Какие данные и в каком порядке указываются в этикетке на пачках электродов.
12. Что такое плавный флюс и как он изготавливается.
13. Для сварки каких материалов применяется плавный флюс.
14. Что такое керамический флюс и как он изготавливается.
15. Для сварки каких материалов применяется керамический флюс.

Глава 8 ВЫБОР ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

8.1 ПОРЯДОК ВЫБОРА ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

При выборе сварочного источника питания для дуговой сварки необходимо учитывать его возможности. Сварочные источники рассчитываются на определенную величину тока нагрузки (I_n) и напряжения (U_n), называемые номинальными. При изготовлении металлоконструкций машиностроения и устройств опасных производственных объектов рекомендуется применять источники питания для ручной дуговой сварки по величине номинального тока не менее 200 А. при ПН или ПВ не менее 60 %, [4].

Расчет режима сварки должен выполняться с учетом теплового режима работы источника. Поэтому различают продолжительный, перемежающийся и повторно-кратковременный режимы работы источника.

При продолжительном режиме работы источника дуга горит непрерывно длительное время. Если величина тока при этом равна номинальному I_n , то температура нагрева токоведущих частей устанавливается на уровне, предельно допустимом для электропроводящих материалов и изоляции. При продолжительном режиме работы источника устанавливать ток выше номинального не допускается.

При перемежающемся режиме в течение цикла $T_u = t_{zd} + t_{xx}$ продолжительность периода горения дуги (t_{zd}), когда источник нагревается, перемежаются с периодами работы источника на холостом ходу (t_{xx}), когда источник остывает. Такой режим принято характеризовать относительной продолжительностью нагрузки:

$$ПН = \frac{t_{zd}}{(t_{zd} + t_{xx})} 100\% = \frac{t_{zd}}{T_u} 100\%. \quad (8.1)$$

При повторно-кратковременном режиме в течение цикла $T_u = t_{zd} + t_{омк}$ продолжительность горения дуги t_{zd} чередуется со временем полного отключения источника от питающей сети $t_{омк}$. Такой режим характеризуется относительной продолжительностью включения и используется при механизированной и автоматической сварке:

$$ПВ = \frac{t_{zd}}{(t_{zd} + t_{омк})} 100\% = \frac{t_{zd}}{T_u} 100\%. \quad (8.2)$$

Источники питания, предназначенные для ручной дуговой сварки, обычно рассчитываются на номинальную относительную продолжительность нагрузки ПН равно 60 % при времени цикла сварки $T_u = 5$ мин. Это означает, что источник при величине номинального тока I_n не будет перегреваться, если в течении пяти минутного цикла дуга будет гореть не менее 3 мин. При любом другом режиме источник не будет перегреваться, если тепловыделение в источнике с внутренним

сопротивлением R_u за время цикла не будет превышать тепловыделения при номинальном режиме

$$I^2 R_u t_{\text{зд}} \leq I_n^2 R_u t_{\text{зд}}. \quad (8.3)$$

Разделив обе части уравнения (8.3) на $T_{\text{ц}}$, и после преобразований получают

$$I^2 ПН \leq I_n^2 ПН_n. \quad (8.4)$$

По соотношению (8.4) можно определить допустимую величину тока источника при ПН, отличной от номинальной

$$I = I_n (ПН_n / ПН)^{0,5}.$$

Можно определить ПН, допустимую при токе I , отличающимся от номинального I_n :

$$ПН = ПН_n I^2 / I_n^2.$$

8.2 ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВАРОЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

В зависимости от способа сварки и назначения сварочные источники имеют различные вольтамперные характеристики, [4]. Источники питания для ручной сварки имеют характеристики крутопадающие рис. 8.1, комбинированные рис. 8.2, комбинированные со штыковым участком в рабочем интервале, рис. 8.3. Для сварки в защитных газах и сварке под флюсом электродными проволоками диаметром до 2,4 мм источники питания должны иметь жёсткие рис. 8.4, б или комбинированные характеристики, рис. 8.4, а.

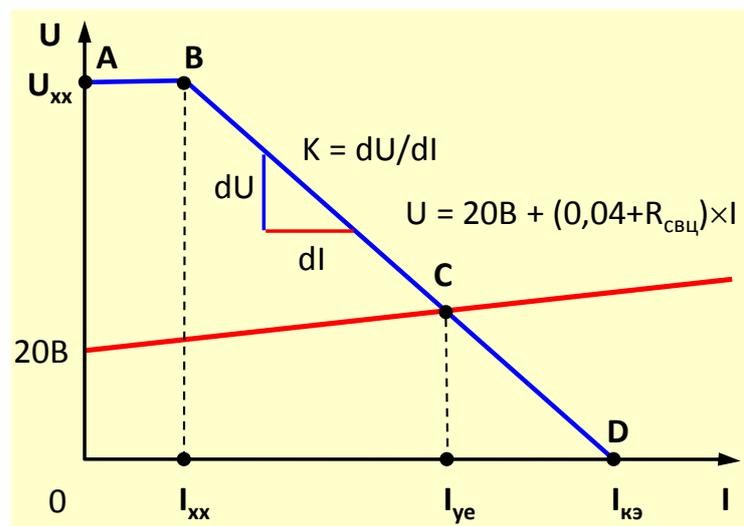


Рис. 8.1. Вольтамперная характеристика источника питания 1 для режима ручной сварки электродами с целлюлозным и рutilовым покрытием; 2 – нагрузочная характеристика для РДС

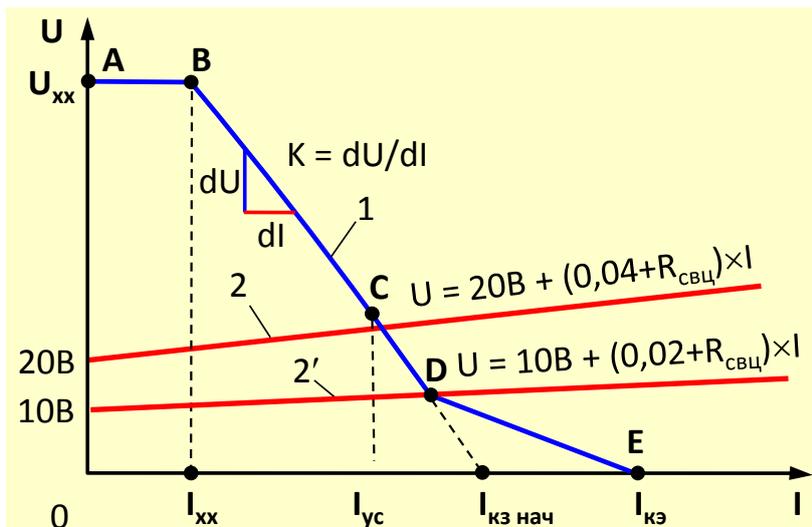


Рис. 8.2. Вольтамперная характеристика источника питания 1 для режима ручной сварки электродом с основным покрытием; нагрузочные характеристик: 2 – для РДС; 2' – для неплавящегося электрода

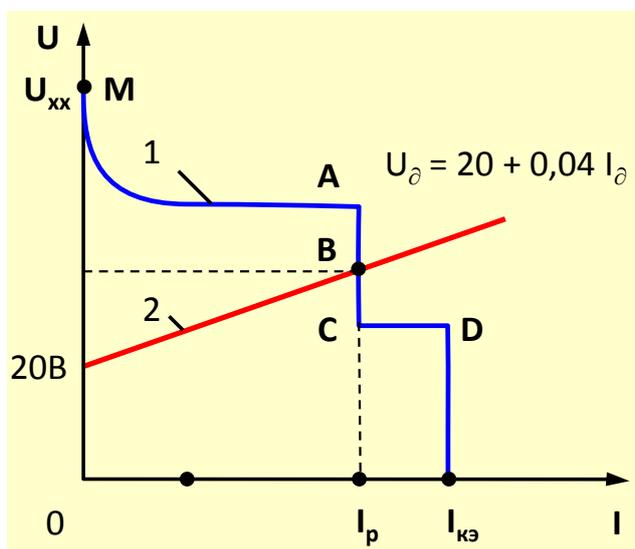


Рис.8.3. Вольтамперная характеристика источника питания 1 при ручной дуговой сварке; 2 – нагрузочная характеристика

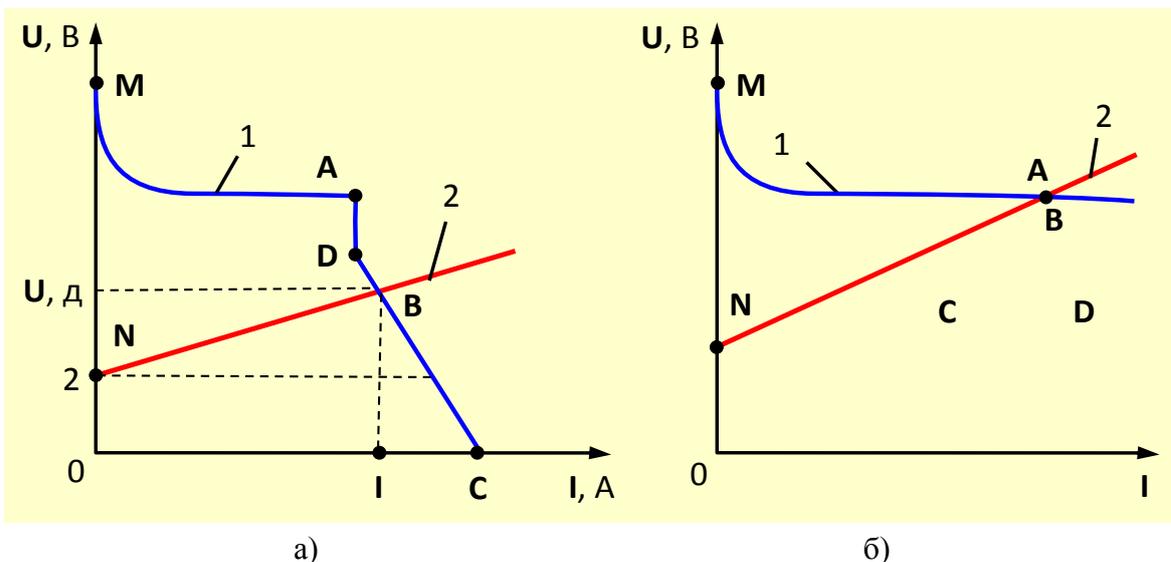


Рис. 8.4. Вольтамперная характеристика источника 1 и нагрузочная 2 при автоматической сварке: а – комбинированная; б – жёсткая

Кривая М-А-D-B-C, рис. 8.4, а является статической комбинированной ВАХ источника питания и предназначена для автоматической сварки под флюсом электродной проволокой диаметром более 2,5 мм. Кривая N-B – характеристика нагрузки ($U_0 = 20 + 0,04I_0$): сварочный ток в соответствии с расстоянием между точкой В и осью ординат – диапазон регулирования сварочного тока от 60А до максимального уровня конкретного источника.

Жесткая ВАХ источника питания, рис. 8.4, б предназначена для автоматической сварки под флюсом электродной проволокой менее 2,5 мм. Кривая N-B – характеристика нагрузки ($U_0 = 14 + 0,05I_0$). Сварочное напряжение определяется расстоянием между точкой А и осью абсцисс. Диапазон регулирования напряжения от 20 В до максимального уровня сварочного напряжения.

Для ручной дуговой сварки источник питания имеет вольтамперную характеристику М-А-B-C со штыковым участком А-B-C, рис. 8.3. Кривая N-B является кривой нагрузки $U_0 = 20 + 0,04I_0$.

Участок CD статической характеристики соответствует току короткого замыкания, диапазон его изменения составляет – от 0 до 200 А.

Вольтамперная характеристика источника питания для сварки неплавящимся электродом в среде защитных газов, рис. 8.5.

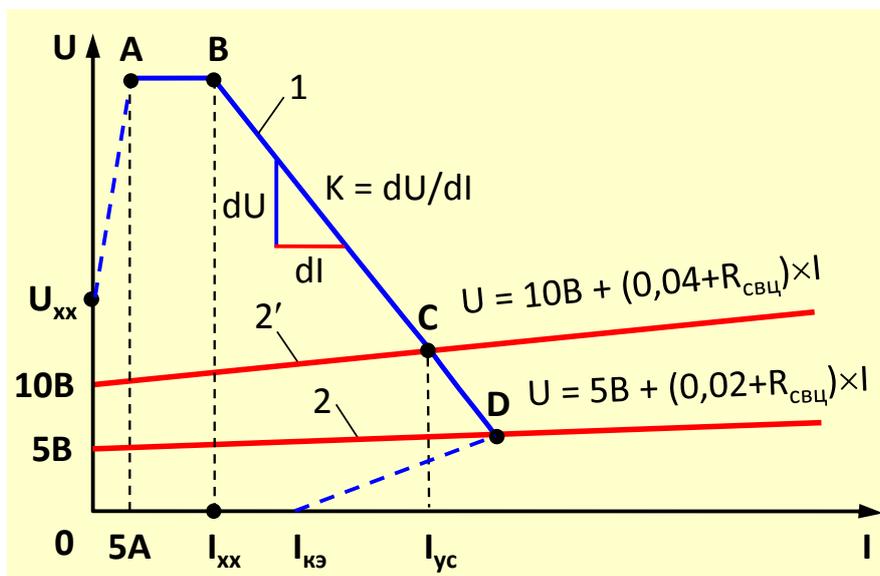


Рис. 8.5. Вольтамперная характеристика источника питания для сварки в защитных газах 1; нагрузочные характеристики: 2 – плавящимся электродом в среде защитных газов; 2' – для неплавящегося электрода; $R_{свц}$ – сопротивление сварочной цепи

При зажигании дуги методом «короткого замыкания» зажигание дуги происходит после отрыва разогретого электрода от изделия. В этом режиме ограничивается ток короткого замыкания до установленной величины, чтобы не было перегрева элементов сварочной цепи и выхода из рабочего положения автоматического выключателя. Напряжение холостого хода ограничено величиной 12 В и не ограничивается в период сварки.

При бесконтактном зажигании дуги путем пробоя дугового промежутка высоким напряжением высокой частотой импульсов от осциллятора. В этом режиме

ток зажигания дуги ограничивается величиной 20 А, а напряжение холостого хода при зажженной дуге устанавливается от 50 до 85 В.

Система управления источником питания формирует вольтамперную характеристику (зависимость – ABDE), приведенную на рис. 8.5.

Участок BD задает входную характеристику источника, где формируется общая рабочая точка, определяющая параметры режима по току и напряжению. Положение этого отрезка задается с помощью координат точки С и наклона К отрезка. Положение точки С определяется пересечением прямой, заданной уравнением: $U = 10 + (0,04 + R_{свг}) I_{\delta}$ и установленного тока для сварочного процесса – I_{yc} .

Зона «холостого хода» начинается при токе меньшем, чем величина тока I_{xx} . При этом система управления ограничивает напряжение холостого хода до 85 В. При токе меньшем 5 А, система ограничивает напряжение холостого хода на уровне, установленном сварщиком.

8.3 НАСТРОЙКА РЕЖИМОВ СВАРКИ

Энергетические параметры режима сварки – величина тока I_{δ} и напряжение дуги U_{δ} обычно устанавливаются перед началом процесса с помощью регуляторов, имеющих в составе источника или технологического оборудования, путем воздействия на напряжение холостого хода U_0 источника или его внутреннее сопротивление Z_u для параметрических источников питания. В статическом режиме напряжение дуги $U_{\delta} = U_0 - U_{\delta} Z_u$, а величина тока дуги

$$I_{\delta} = (U_0 - U_{\delta}) / Z_e \quad (8.5)$$

Из (8.5) следует, что для увеличения сварочного тока нужно увеличивать либо U_0 , либо снижать сопротивление источника Z_u при $U_{\delta} = const$.

Сварочная дуга и источник питания являются нелинейными электрическими элементами. Параметры режима при ручной дуговой сварке определяются точкой пересечения ВАХ источника $U_u = f(I_{\delta})$, которые могут быть жесткими, пологопадающими, крутопадающими и комбинированными (рис. 8.1 – рис. 8.5) и ВАХ дуги $U_{\delta} = f(I_{\delta})$, которая имеет U образную форму.

Для поддержания постоянной длины дуги с ростом тока необходимо увеличивать и напряжение. Поэтому при настройке параметров режима ВАХ дуги заменяют эмпирической кривой условной рабочей нагрузки $U_p = f(I_{\delta})$, рис. 8.6. Например, при ручной дуговой сварке плавящимся электродом такая кривая описывается эмпирической зависимостью (8.6) в диапазоне изменения тока от $I_{\delta min}$ – $I_{\delta max}$ или кратностью регулирования тока $I_{\delta max} / I_{\delta min}$.

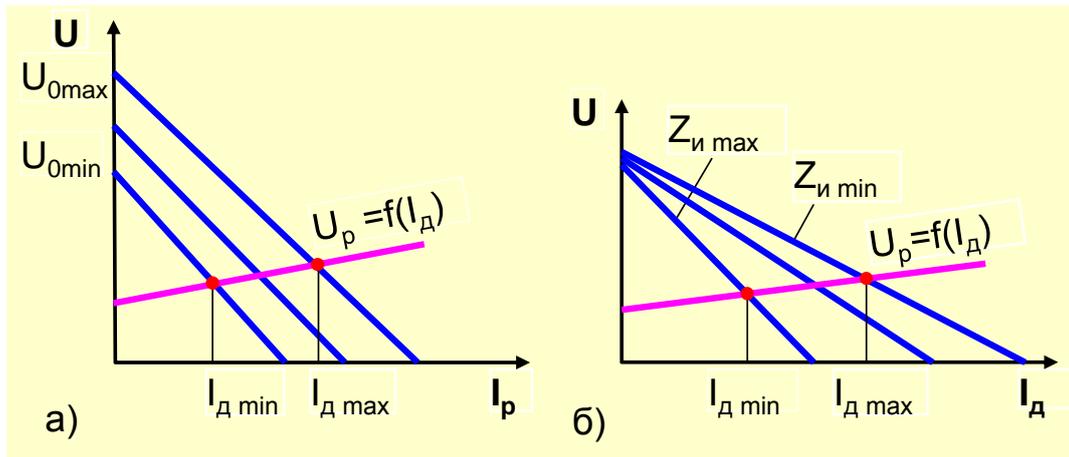


Рис. 8.6. Настройка режима сварки изменением: *а* – напряжения холостого хода источника; *б* – внутреннего сопротивления

Для неплавящегося электрода в аргоне:

$$U_p = f(I_d) = 10 + 0,04I_d \quad (8.6)$$

Для плавящегося электрода при ручной дуговой сварке

$$U_p = f(I_d) = 20 + 0,04I_d \quad (8.7)$$

Для механизированной дуговой сварке в защитных газах

$$U_p = f(I_d) = 14 + 0,05I_d \quad (8.8)$$

Для автоматической дуговой сварке под флюсом

$$U_p = f(I_d) = 21 + 0,04I_d \quad (8.9)$$

Источник питания характеризуется диапазоном регулирования тока.

Для механизированной сварки электродными проволоками диаметром до двух миллиметров применяются подающие механизмы, у которых скорость подачи не зависит ни от тока, ни от напряжения дуги. В этом случае характеристика регулятора описывается уравнением 8.9 при условии, что дуга имеет жесткую характеристику $\rho_d = 0$:

$$I_d = V_n/k_{cm} + k_{cn}U_d/k_{cm} \quad (8.10)$$

где k_{cm} и k_{cn} – коэффициент саморегулирования по току и напряжению соответственно; V_n – скорость подачи электродной проволоки.

Первое слагаемое (8.9) определяется скоростью подачи проволоки и представляет собой заданное значение тока, т.е. $V_n/k_{cm} = I_{zm}$. Характеристика регулятора в этом случае принимает вид

$$I_d = I_{zm} + k_{cn}U_d/k_{cm} \quad (8.11)$$

При малых величинах V_n второе слагаемое мало и характеристика регулятора близка к вертикальной. С ростом V_n второе слагаемое начинает оказывать существенное влияние и наклон характеристики возрастает. Точка устойчивой работы определяется точкой пересечения ВАХ источника питания 1, 2 с характеристикой регулятора 3-4, рис. 8.7.

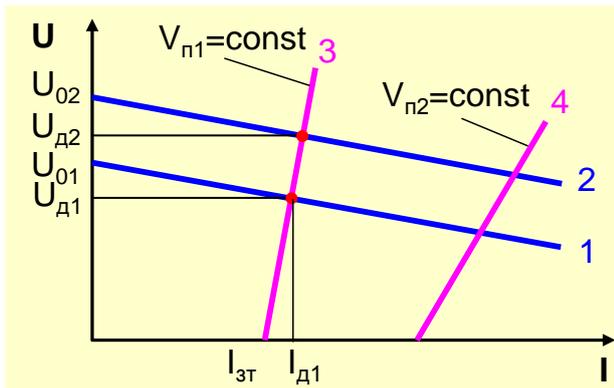


Рис. 8.7. Настройка режима при механизированной сварке тонкими электродными проволоками

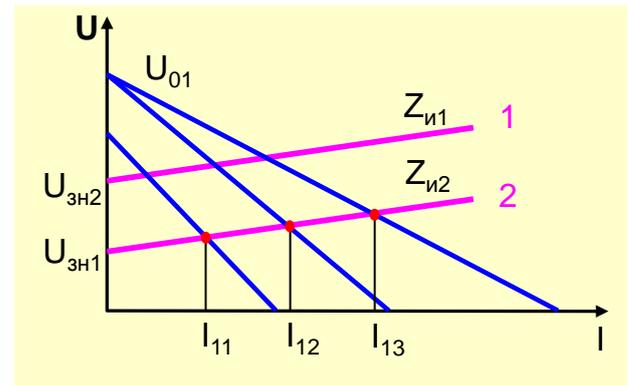


Рис. 8.8. Настройка режима при механизированной сварке толстыми электродными проволоками

В этой системе ток дуги, в основном, устанавливается скоростью подачи электрода, а напряжение дуги за счет настройки источника питания. При этом ВАХ ИП должны быть пологопадающими.

Для механизированной сварки электродными проволоками свыше 4 мм под флюсом применяется зависимая система подачи электродной проволоки от напряжения на дуге. Уравнение вольтамперной характеристики такого регулятора описывается (8.12)

$$U_{\delta} = \frac{k_{нд} U_{зн}}{k_{нд} + k_{сн}} + \frac{k_{сн} I_{\delta}}{k_{нд} + k_{сн}}, \quad (8.12)$$

где $k_{нд}$, $k_{сн}$, $k_{сн}$ – коэффициент усиления системы, коэффициент саморегулирования по току и напряжения соответственно. Первое слагаемое (8.12) – приведенное заданное напряжение $k_{нд} U_{зн} / (k_{нд} + k_{сн}) = U'_{зн}$ при $I_{\delta} = 0$. Тогда (8.12) запишется как

$$U_{\delta} = U'_{зн} + \frac{k_{сн} I_{\delta}}{k_{нд} + k_{сн}} \quad (8.13)$$

Ток дуги определяется точкой пересечения ВАХ источника питания (3, 4, 5) с характеристикой регулятора (1–2), (рис. 8.8).

Наклон ВАХ ИП назначается из условия обеспечения высокой стабильности тока, которая достигается при использовании крутопадающих характеристик.

Настройка напряжения дуги в этой системе производится за счет изменения $U_{зн}$ с помощью датчиков напряжения, которые находятся на сварочных автоматах. Настройка величины тока выполняется регулятором источника питания, изменяющим напряжение холостого тока U_0 или сопротивлением источника Z_u .

Большинство выпускаемых источников питания имеют плавную настройку напряжения. Иногда регуляторы источников позволяют изменять U_0 или Z_u только дискретно. Например, при витковом управлении число витков может быть только целым. В этом случае настройка получается ступенчатой и отклонение между двумя смежными величинами токов не должно превышать 7,5 % большей величины тока. Для расширения плавности настройки режима иногда источник

дополняют ступенчатым управлением (2 – 3 ступени), при этом диапазоны ступеней величин токов должны перекрываться.

8.4 НАСТРОЙКА СИСТЕМЫ НА ЗАДАННЫЙ РЕЖИМ

Настройка системы по току при заданном (неизменном) напряжении на дуге, [3]. Из построения на рис. 8.9 следует, что для изменения тока на ΔI при неизменном напряжении на дуге необходимо перейти из точки 1 на новую характеристику системы саморегулирования дуги v_{n2} и новую характеристику источника питания (рабочая точка 2):

$$v_{n1} < v_{n2}.$$

При переходе от точки 1 к точке 1' $\Delta I_1 = \Delta U k_{nc}$.

При переходе от точки 1' к точке 2, $\Delta I_2 = \Delta U k_{oc}$. Полное изменение тока

$$\Delta I = \Delta I_1 + \Delta I_2 = \frac{\Delta U (k_{nc} k_{oc} + 1)}{k_{oc}} \quad (8.14)$$

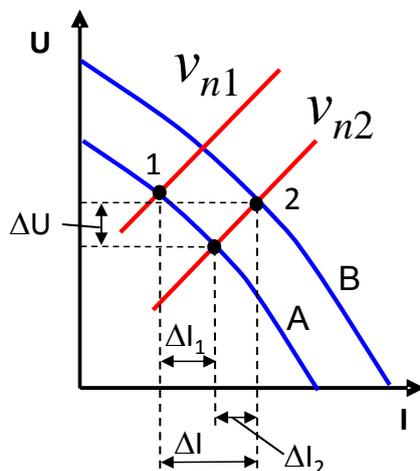


Рис. 8.9. Настройка системы по току при неизменном напряжении на дуге

$$\Delta U = \Delta I / k_{nc}$$

- при переходе от точки 1' к точке 2

$$\Delta U_2 = \Delta I k_{oc}$$

- полное изменение напряжения

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 = \frac{\Delta I (k_{nc} k_{oc} + 1)}{k_{nc}} \quad (8.15)$$

Таким образом, увеличение напряжения на дуге осуществляется уменьшением скорости подачи электрода (переход от v_{n2} к v_{n1}) и переходом на новую характеристику источника питания (от характеристики А на характеристику В).

Как в первом, так и во втором случаях, необходимые изменения параметров режима осуществляются в два приема совместным изменением скорости подачи

Таким образом, увеличение тока осуществляется увеличением скорости подачи электрода (переход от v_{n1} к v_{n2} и переходом на новую характеристику источника питания (от характеристики А на характеристику В).

Настройка системы по напряжению при заданном (неизменном) токе.

Из построения на рис. 8.10:

- при переходе от точки 1 к точке 1'

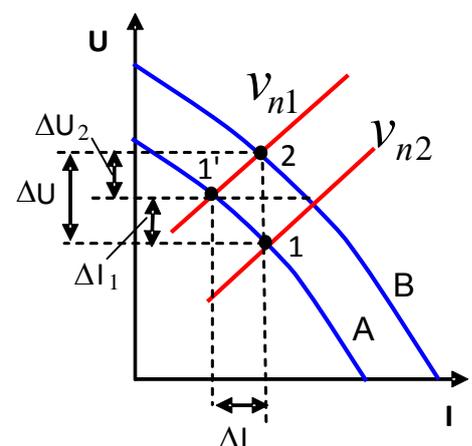


Рис. 8.10. Настройка системы по напряжению при неизменном токе дуги

электрода и характеристики источника питания (переход от характеристики А к характеристике В).

Практически первая задача решается следующим образом:

– задаемся значением ΔI ;

– увеличиваем скорость подачи электрода v_{n1} к v_{n2} , чтобы напряжение снизилось на ΔU ;

$$\Delta U = \frac{\Delta I k_{dc}}{k_{nc} k_{dc} + 1} \quad (8.16)$$

– увеличиваем напряжение источника питания до полного его восстановления.

Аналогично решается вторая задача:

– задаемся величиной ΔU ;

– уменьшаем скорость подачи электрода с v_{n2} до v_{n1} так, чтобы ток снизился на ΔI :

$$\Delta I = \frac{\Delta U k_{nc}}{k_{nc} k_{dc} + 1} \quad (8.17)$$

– увеличиваем напряжение источника питания до полного восстановления тока.

8.5 ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Трансформаторы предназначены для сварки штучными электродами переменным током малоуглеродистых и низколегированных сталей. Сварочные трансформаторы просты, надежны в эксплуатации и в обслуживании, рис. 8.11. Технические данные приведены в [4]. Они выпускаются с естественным охлаждением – ТДМ-140, ТДМ-169; и с принудительным – ТДМ-180, ТДМ-200, ТДМ-315.

Регулирование сварочного тока в ТДМ-140, ТДМ-180, ТДМ-250, ТДМ-315 производится перемещением вторичных обмоток, а в ТДМ-259, ТДМ-300, ТДМ-200, ТДМ-504-1, ТДМ-504-2 перемещением магнитного шунта.

Трансформаторы - ТДМ-180, ТДМ-250, ТДМ-300, ТДМ-315, ТДМ-504-1, ТДМ-504-2 для возможности передвижения установлены на колеса.

Предназначены для работы в сложных климатических условиях с диапазоном температуры от -40 до $+40$ °С.

Сварочные процессы и оборудование



Рис. 8.11. Сварочные трансформаторы фирмы «ИНЖЕНЕРНЫЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СЕРВИС»

8.6 ИСТОЧНИКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Сварочные выпрямители отечественного производства ВД-306ДК и ВД-506ДК – источники постоянного тока предназначены для ручной дуговой сварки плавящимися электродами с основным или целлюлозным покрытием и неплавящимися электродами в среде защитного газа металлов, и его сплавов, а так же для механизированной дуговой сварки в среде защитного газа, рис. 8.12.

Сварочные процессы и оборудование



ВД-306ДК

ВД-506ДК

Рис. 8.12. Выпрямители сварочные

Выпрямители обеспечивают:

- крутопадающие внешние характеристики со ступенчатой регулировкой наклона вольтамперной характеристики, предназначенные для ручной дуговой сварки штучными электродами с основным покрытием;
- комбинированные пологопадающие внешние характеристики со ступенчатой регулировкой наклона вольтамперной характеристики, предназначенные для ручной дуговой сварки штучными электродами с целлюлозным покрытием;
- штыковую внешнюю характеристику, предназначенную для дуговой сварки неплавящимся электродом в среде аргона;
- комбинированные внешние характеристики со ступенчатой регулировкой наклона участка вольтамперной характеристики, предназначенные для полуавтоматической дуговой сварки в среде защитного газа;
- возможность полуавтоматической сварки в среде защитного газа сплошной, порошковой проволокой и полуавтоматической сварки самозащитной проволокой;
- возможность полуавтоматической сварки с различными сварочными механизмами и сварки неплавящимся электродом с различными устройствами для этого;
- возможность регулирования параметров с пульта дистанционного управления и подающих механизмов;
- возможность установки на колеса для облегчения перемещения;

Технические характеристики выпрямителей приведены в [3].

Сварочные процессы и оборудование

Сварочные системы в своем составе кроме выпрямителя ВД-306ДК или ВД-506ДК могут иметь: блок аргонодуговой сварки (БУСП-ТИГ), рис. 8.13; подающий механизм для механизированной сварки ПДГО-510Т или ПДГО-511; блок охлаждения автономный (БВА), а так же принадлежности (электрододержатели, сварочные горелки, зажимы); кабели сварочные и соединительные.



Рис. 8.13. Блок аргонодуговой сварки БУСП-ТИГ



Рис. 8.14. Выпрямитель ВДУ-306МТУЗ

Сварочные системы на базе выпрямителей ВД-306ДК и ВД-506ДК одобрены ОАО «ВНИИСТ» и ОАО «ВНИИГАЗ» для применения при проведении сварочных работ на нефте- и газопроводах, внесены в нормативные документы ОАО «Газпром» и ОАО Транснефть».

Выпрямитель ВДУ-306МТ – источник параметрического типа, рис. 8.14 и Урал-мастер 300 с инверторным преобразователем, рис. 8.15, предназначены для питания одного поста ручной дуговой сварки электродом с любым типом покрытия.

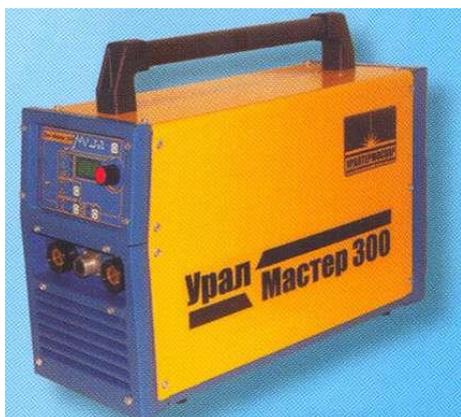


Рис. 8.15. Выпрямитель Урал

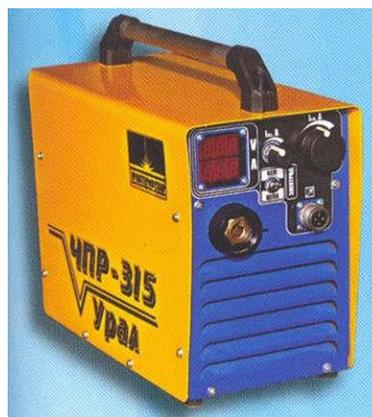


Рис. 8.16. Постовой регулятор ЧПР-315 УРАЛ

Они обеспечивают:

- предварительную плавную регулировку тока (в том числе дистанционное) во всем диапазоне

Сварочные процессы и оборудование

- форсирование тока короткого замыкания;
- защиту от прилипания электрода при зажигании дуги;
- ограничение напряжения холостого хода;
- индикацию параметров сварки на цифровом дисплее и автосохранение параметров сварки при отключении питания;
- защиту от оседания пыли (полностью герметичные печатные платы);
- возможность использования сетевых кабелей большой длины;
- устойчивость к вибрационным нагрузкам.

Выпрямители предназначены для использования в тяжелых трассовых условиях для сварки неповоротных стыков труб нефте- и газопроводов, и других ответственных конструкций. Выпрямитель ВДУ-306МТУЗ применяется для комплектации сварочных комплексов.

Частотный постовой регулятор ЧПР-315 УРАЛ предназначен для регулирования сварочного тока одного поста ручной дуговой сварки в многопостовой системе, работающей от источника типа ВДМ (взамен балластного реостата), рис. 8.16.

Изменение сопротивления сварочной цепи производится микропроцессорным управлением высокочастотным силовым транзистором; и обеспечивает плавное регулирование тока во всем диапазоне (в том числе дистанционное); стабилизацию сварочного тока при колебаниях напряжения на выходе выпрямителя при смене режима работы других постов.

Технические параметры оборудования для сварки нефтегазопроводов приведены в [3].

Подающие механизмы в комплекте с выпрямителями, имеющими жесткую или комбинированную вольтамперные характеристики, предназначены для механизированной дуговой сварки (МП) металлов. и подсоединяются к ним напрямую или через блоки питания БП-01 или БП-02.

Подающие механизмы ПДГ-312-5, ПДГ-322М, ПДГ-401, ПДГО-510, ПДГО-510Т, ПДГО-511 имеют встроенный блок управления, позволяющий управлять элементами цикла сварки непосредственно с механизма, встроенный привод, газовый клапан и узел стыковки со сварочными горелками, рис. 8.17. Технические параметры оборудования приведены в [3].



Рис. 8.17. Подающие механизмы серии ПДГ

Подающие механизмы имеют возможность плавного регулирования скорости подачи сварочной проволоки.

Наличие глубокой стабилизации скорости подачи сварочной проволоки и стабилизации по питающему напряжению позволяет подающим механизмам ПДГО-510 с БУСП-06, ПДГО-510Т, ПДГО-511 находиться от источника сварочного тока на расстоянии 50...100 м, рис. 8.18.



ПДГО-510



ПДГО-511



ПДГО-601



ПДГО-510Т



ПДГО-602

Рис. 8.18. Подающие механизмы серии ПДГО

Подающие механизмы ПДГ-322М с БУСП-06, ПДГ-421, ПДГ-312-5, ПДГ-401, ПДГО-510, ПДГО-510Т, ПДГО-511 имеют два режима сварки: «длинные швы» и «короткие швы».

Объединение ШТОРМ LORCH выпускает современные сварочные источники питания с инверторным преобразователем для ручной дуговой сварки серия Handy (рис. 8.19) и других способов дуговой сварки с плавящимся и не плавящимся электродами.

Источники питания серия Handy – легкие источники питания с микропроцессорной настройкой параметров режима. С помощью цифрового управления создаются условия оптимальной регулировки параметров сварочной дуги: горячий старт; функцию предотвращения залипания электрода; регулируемый форсаж дуги поддерживает сварочный процесс с повышенной её устойчивостью и оптимизированным переносом капель металла.

Сварочные процессы и оборудование

Источники предназначены для ручной дуговой сварки плавящимися электродами диаметром до 5 мм с основным, рутиловым и специальным покрытием и неплавящимся электродом. Они обеспечивают надежную сварку вертикального шва сверху вниз целлюлозными электродами до 3,2 мм, снижают разбрызгивание металла при сварке, компенсируют погрешности при манипуляциях, обеспечивает чрезвычайно простое управление.



Handy 180



Handy 200

Рис. 8.19. Источники питания серия Handy

Источники питания серии X (X350/X350PST), рис. 8.20, созданы для эксплуатации на открытых площадках в сложных монтажных условиях, для выполнения ремонтных работ при сварке электродами большого диаметра до 8 мм с различными видами покрытия. При сварке электродами с целлюлозным покрытием вертикальных швов сверху вниз источники обеспечивают получение качественных сварных соединений.



Рис. 8.20. Источники питания серия X (X350/X350PST)

С помощью цифрового управления созданы условия оптимальной регулировки параметров сварочной дуги: горячий старт; функцию предотвращения залипания электрода; стабилизацию сварочной дуги при колебаниях напряжения сети, и в случае большой длины (до 100 м) сетевого кабеля.

В источниках данной серии для сварки TIG заложены все необходимые функции процесса в его систему автоматического управления, рис. 8.20. Сварщик избавлен от выбора варианта настройки режима сварки. Управление источником очень простое. Сварщик устанавливает способ сварки и величину сварочного тока. Все остальные пара-

метры режима устанавливаются автоматически.

Источник обеспечивает: бесконтактное ВЧ-зажигание дуги; автоматическое управление защитным газом до и после сварки, что позволяет защитить электрод и шов от окисления; функцию вторичного тока, предотвращающую провалы сварочной ванны при перегреве детали, за счёт снижения тока; функцию снижения тока при окончании сварки для обеспечения сварного шва без образования кратера; импульсную функцию (импульс малой длительности до 2 кГц).

Источник с цифровой индикацией сварочного тока сохраняет в памяти до 4 сварочных заданий. Он компактный, малой массы с большой продолжительностью включения. Источники Handy TIG AC/DC имеют дополнительное переключение с DC на AC

В установках данной серии кроме классической горелки с клавишей двойного нажатия можно использовать также горелку с ДУ и клавишей «Повысить-понизить», что позволяет управлять сварочным током с горелки, рис. 8.21.



Рис. 8.21. Горелка с дистанционным управлением

Источники питания серии Т с инверторным преобразователем предназначены для сварки неплавящимся и плавящимся электродами на постоянном и переменном токах тонкостенных конструкций, точечных и протяжённых швов, рис. 8.22. Они могут работать в импульсном режиме или режиме с импульсами малой длительности до 2 кГц. Источники обеспечивают контактное и бесконтактное ВЧ-зажигание дуги. Возможность подключения подающего механизма типа FEED для подачи в зону горения дуги присадочной проволоки.

Источники серия Т AC/DC имеет переключатель с DC на AC для сварки алюминия и его сплавов. Зажигание дуги производится на положительной полярности и одновременно осуществляется автоматический контроль за острием электрода. В памяти источника сохраняется до 100 сварочных заданий.

Сварочные процессы и оборудование



Рис. 8.22 Источники питания серия Т: а – Т-250; б – Т-300

Установка комплектуется двумя типами горелок: сварочная горелка с клавишей двойного нажатия для включения/выключения точного сварочного тока и его «немедленного» понижения; другой – сварочная горелка с клавишей «Повысить-понизить». Прямо на горелке можно управлять процессом сварки и регулировать сварочный ток с точными показаниями в амперах.

Данная серия снабжена пультом ДУ и может использоваться в качестве мобильного устройства, а с опцией водяного охлаждения и тележкой Махи, становится удобным устройством для мастерской и монтажных площадок.

Источники питания серии V с инверторным преобразователем предназначены для ручной и автоматической сварки неплавящимся и плавящимся электродами стальных и алюминиевых конструкций, рис. 8.23. Они предназначены для работы на постоянном и переменном токе в стационарных и монтажных условиях.



Рис. 8.23. Источники питания серия V: а – V 24; б – V 30; в – V 24 с водоохладителем WUK 6; г – V 50 с проволокоподающим блоком Feed

Программная система управления сварочной дугой обеспечивает автоматическое управление всеми параметрами режима сварки и функциями работы установки (зажигания дуги, регулирование тока в процессе сварки, понижение тока во время окончания сварки). В любое время можно вызвать до 100 заданий.

При сварке тонких листов источники могут работать в импульсном режиме малой длительности с частотой до 2 кГц. Источники имеют разъем для подключения устройствами дистанционного управления (ручным или ножным)

В источниках серия V AC/DC предусмотрен переключатель с DC на AC, Сварка алюминиевых сплавов производится на переменном токе прямоугольной формы с различной длительностью положительных и отрицательных полуволн.

Источник питания с устройством водяного охлаждения WUK 6 рис. 8.23, в и баллон с защитным газом устанавливаются на мобильную тележку. Сварочная горелка работает с газовым или водяным охлаждением

Для автоматической подачи присадочной проволоки в зону горения дуги источник комплектуется проволока подающим устройством Feed, рис. 8.23, г.

Блок подачи присадочной проволоки Feed для сварки TIG предназначен для заполнения зазоров стыкуемых деталей путем подачи проволоки в зону горения дуги с высокой точностью и необходимой скоростью (0,1...6,0 м/мин) для получения швов заданных размеров, рис. 8.24.



Рис. 8.24. Блок подачи присадочной проволоки Feed

Высокоточная подача проволоки в блоке Feed достигается за счёт цифрового управления тахометрическим двигателем с четырёх роликовым механизмом её подачи. Блок Feed используется для автоматической подачи проволоки при ручной сварки и в качестве интегрированного компонента автоматизированной системы при автоматической сварки. Подача проволоки производится в непрерывном и импульсном режиме до 5 имп/с. Синергическая функция обеспечивает автоматическую корректировку подачи проволоки при изменении тока. Блок снабжён текстовым дисплеем с выбором языка.

8.7 УСТАНОВКИ ДЛЯ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

Установка серии М-Pro с микропроцессорным управлением с принципом «3 шага до сварки» предназначены для MIG/MAG сварки конструкционных низкоуглеродистых, нержавеющей сталей и алюминиевых сплавов, рис. 8.25. Они оснащены современным синергетическим управлением, которое позволяет установить только параметры комбинации свариваемый материал – проволока – газ, все остальные энергетические параметры режима сварки устанавливаются автоматически по толщине свариваемого материала. Подача проволоки автоматически устанавливается в соответствии с выбранным уровнем напряжения. Электронная логика управления MIG/MAG с 2- и 4-тактным режимом, а также регулировкой точечной и непрерывной сварки.



Рис. 8.25. Установка серии М-Pro 300: а – в компактном исполнении; б – со съёмным механизмом подачи проволоки

Выпрямители снабжены высококачественным вольтамперным индикатором и выпускаются с поворотным или съёмным 4-х роликовым механизмом подачи проволоки и шланг-пакетами различной длины, что необходимо при работе с крупногабаритными деталями и в ограниченном пространстве. Выпрямители, в этом варианте исполнения устанавливаются с 50-литровым баллоном защитного газа на тележку.

Установки серии М 3000 содержат выпрямители параметрического типа серия М 3000 предназначены для MIG/MAG сварки толстолистовых конструкций из

Сварочные процессы и оборудование

конструкционных низкоуглеродистых, нержавеющей сталей и алюминиевых сплавов, рис. 8.26.



Рис. 8.26. Выпрямители серия М 3000: а – в виде компактного устройства; б – с внешним блоком подачи проволоки

Выпрямители укомплектованы встроенным или внешним 4-х роликовым блоком подачи проволоки. Управляемая микропроцессором регулировочная автоматика меняет скорость подачи проволоки в соответствии с выбранной степенью напряжения и автоматически настраивает дроссельную систему, обеспечивая зажигание с малым количеством утыканий, обеспечивает регулировку газа в конце сварки и времени точечной сварки (24 степени мощности).

Установки серии С укомплектованы источниками питания с инверторным преобразователем предназначены для MIG/MAG сварки с синергетическим управлением. Оптимальные настройки осуществляются с помощью электронной системы Digastep (в памяти содержится 41 программа). Источнику серии С задается только комбинация «материал – проволока – защитный газ». Система управления быстро реагирует и автоматически предоставляет все остальные энергетические параметры режима сварки в виде цифровой индикация сварочного тока и напряжения благодаря функции синергетике. В памяти микропроцессора сохраняются программы TipTronic для 100 сварочных задач. Источник питания и подающий механизм укомплектованы тестовыми дисплеями с выбором желаемого языка.

Устройство представлено либо в компактном исполнении, либо с отдельным 4-х роликовым подающим механизмом, рис. 8.27. Для различных условий сварки подающие механизмы изготавливаются в различных вариантах: для стационарных (цеховых), монтажных, для верфей или роботов. Управление производится по принципу – «Три шага до начала сварки». Предусмотрена возможность дистанционного регулирования со сварочной горелки Powermaster.

Сварочные процессы и оборудование



Рис. 8.27. Выпрямители серия С: *а* – в виде компактного устройства; *б* – с внешним блоком подачи проволоки

В установках серии Р с инверторным преобразователем обеспечивается стабильная и легко управляемая сварочная дуга во всем диапазоне сварочного тока. Устройства этого типа выпускаются в двух исполнениях (вариантах): Р basic и Р synergic. Оба варианта используют принцип управления «Три шага до начала сварки», и укомплектованы 4-роликовым проволокоподающим механизмом, рис. 8.28.

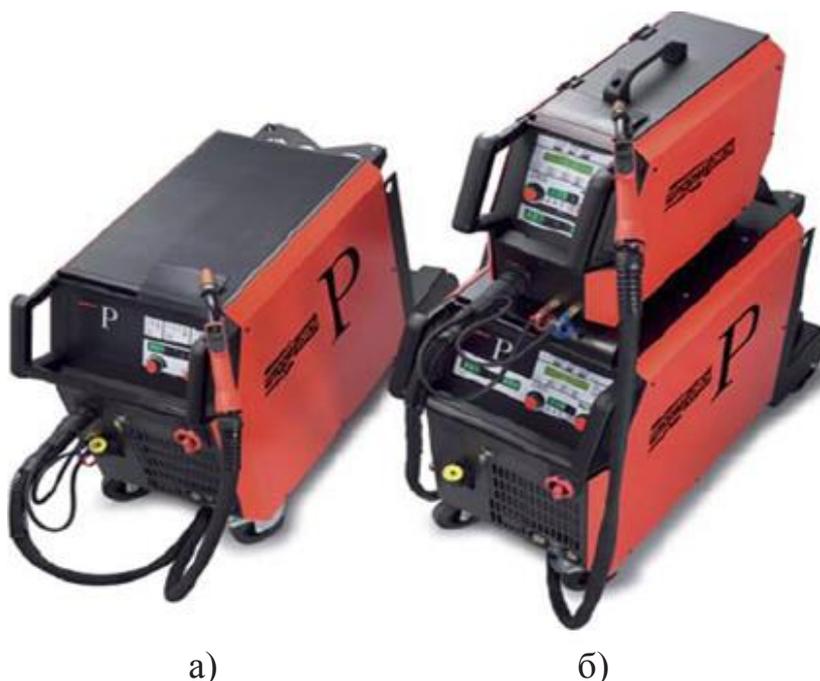


Рис. 8.28. Установки серия Р: *а* – в виде компактного устройства Р basic; *б* – с внешним блоком подачи проволоки Р synergic

Исполнение P basic (регулировка подачи проволоки и напряжения) обеспечивает все функции, необходимые для обычной механизированной MIG/MAG сварки.

Исполнение P synergic (полностью синергическое управление и текстовый дисплей), которое помогает сварщику MIG/MAG решать сложные задачи управления процессом сварки простым.

Источники питания серии P оснащены функцией Speed Arc, предназначенная для выполнения узких разделок кромок, которая обеспечивает улучшенную форму проплавления соединяемых элементов и позволяет увеличить производительность на 30 %.

Цифровая регулировка обеспечивает: надежное и быстрое зажигание дуги; автоматическую регулировку длины сварочной дуги для компенсации неровностей, автоматическое плавное регулировка динамических свойств дуги; регулирование тока при заварке кратера; заострение торца электрода для последующего зажигания дуги. Источники для MIG/MAG серии P выпускаются в виде компактного источника или с внешним блоком подачи проволоки с плавной регулировкой параметров режима с цифровой индикацией сварочного тока и напряжения. Возможны варианты сдвоенной подачи с одним или двумя внешними блоками подачи проволоки

Устройства предназначены для работы в производственных, монтажных условиях и компоновки роботов.

8.8 УСТАНОВКИ ДЛЯ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ СЕРИИ S SPEEDPULSE

Устройства этого типа предназначены для импульсно – дуговой сварки плавящимся электродом углеродистых, нержавеющей сталей и алюминиевых сплавов.

При сварке плавящимся электродом в аргоне и аргоносодержащих смесях в зависимости от характера изменения энергетических параметров режима сварки можно получить несколько типов сварочных дуг и разновидностей переноса электродного металла.

Процесс SpeedArc назначен на повышение качества сварных соединений из толстолистового металла, связанного с обеспечением гарантированного проплавления в корне шва, а также сварки в узкую разделку. Функция SpeedArc в отличие от стандартной струйной дуги поддерживает уверенный струйный процесс переноса металла более короткой дугой. Дуга становится более сфокусированной, очень устойчивой. Благодаря высокому плазменному давлению в дуге обеспечивается более глубокое проплавление и снижается вероятность возникновения подрезов шва. Сварка возможна на больших вылетах – до 40 мм, что позволяет выполнять сварку «в узкую разделку» и при этом получать гарантированный провар корня шва. Возникает возможность снижения угла разделки с 60° до 40° в тех случаях, в которых это допускается. Это позволяет не только существенно сни-

зять расход сварочных материалов, но и повысить производительность сварки за счет уменьшения количества проходов при многопроходной сварке.

SpeedUp предназначен для повышения качества и одновременно упрощения техники сварки швов в вертикальном и потолочном положении. Обычно сварка вертикальных швов требует от сварщика максимального умения и квалификации. С функцией SpeedUp сварщику не нужно выполнять сложные движения горелкой (техникой сварки «елочка» или поперечными колебаниями), ему необходимо лишь перемещать горелку вдоль стыка с постоянной скоростью. Система управления источника питания отрабатывает алгоритм импульсов так, чтобы обеспечить уверенный провар корня и получить качественное формирование шва с плавным переходом на основной металл.

Возможность MIG/MAG сварки без сложных движений горелкой (сварки «елочка» или поперечными колебаниями) достигается комбинированием двух технологий или, точнее, двух фаз сварочной дуги. Первая фаза – «горячая» фаза тока большой силы с высокой подачей энергии – для оптимального расплавления материала. Вторая «холодная» фаза на малой величине тока достаточной для поддержания горения дуги.

Периодически возникающая высокая концентрация энергии дуги, колебания сварочной ванны и циклическое целенаправленное удлинение дуги обеспечивают надежное схватывание боковых кромок. Уменьшенная подача энергии на завершении каждого цикла обеспечивает надежный провар, точное объемное заполнение шва и почти оптимальный катет шва.

SpeedUp – высокопроизводительный процесс сварки MIG/MAG в вертикальном и потолочном положениях. Упрощением техники сварки вертикальных или потолочных швов достигается существенное повышение скорости сварки – до 100 % в сравнении с обычной сваркой MIG/MAG.

SpeedRoot предназначен для MIG/MAG сварки корня шва с высокой производительностью заполнения зазора и гарантированным образованием обратного валика заданной геометрии. Обычные процессы MIG/MAG сварки короткой дугой мало пригодны для этого, так как перенос материала происходит, как правило, со взрывом шейки капли, из-за этого сварочная ванна провисает или шов слишком сильно и неравномерно продавливается через зазор.

Процессы SpeedPuls, SpeedArc, SpeedUp и SpeedRoot не только существенно упрощают технику сварки, значительно повышая качество и производительность, но и, самое главное, позволяют нивелировать низкую квалификацию или отсутствие опыта сварщиков.

Установка с режимом SpeedPulse, рис. 8.29, выпускается в виде компактного устройства или с внешним 4-х роликовым блоком подачи проволоки. Возможны варианты сдвоенной подачи с одним или двумя внешними блоками подачи проволоки. Блоки поставляются в различных исполнениях: для мастерских, монтажа, судостроителей и роботов. Сварочные горелки поставляются с газовым или водяным охлаждением.

Сварочные процессы и оборудование



Рис. 8.29. Установки серия StandartPuls однокорпусного исполнения: *а* – S3 в виде компактного устройства переносного; *б* – S3 передвижной

В микропроцессоре источника питания в памяти сохраняется до 100 сварочных заданий. Установка укомплектована тестовым дисплеем с выбором языка и цифровой индикацией сварочного тока и напряжения. С дистанционного пульта управления, установленного на сварочной горелке Powermaster с 4-х тактным режимом можно вызывать до трёх программ.

8.9 ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ

8.9.1. ПОДВЕСНЫЕ САМОХОДНЫЕ СВАРОЧНЫЕ АВТОМАТЫ

Подвесные самоходные автоматы А 1412 и А 1416 предназначены для дуговой сварки и наплавки низкоуглеродистых и легированных сталей плавящимся электродом под слоем флюса на постоянном токе с независимой скоростью подачи электродной проволоки, с плавным изменением сварочного напряжения, рис. 8.30. Автомат А1406 устанавливается на наплавочные станки и может обеспечивать сварку и наплавку: в среде защитного газа (CO_2); открытой дугой порошковой проволокой и порошковой лентой; под слоем флюса сплошной проволокой; открытой дугой расщепленным электродом (по спецзаказу).

А1416-1 – подвесной самоходный автомат с системой слежения за стыком предназначен для электродуговой сварки плавящимся электродом под слоем флюса длинномерных прямолинейных швов из низкоуглеродистой и легированной стали. Автомат построен на современной элементной базе с применением узлов и компонентов ведущих европейских производителей: “Rexroth”, “Festo”, “Camozzi”, “Lenze”, “Kabelschlepp”. Управление автоматом осуществляется с помощью контроллера производства фирмы “Siemens”. Задание параметров и контроль работы механизмов может производиться как с пульта управления, установленного на сварочной головке, так и с пульта, установленного в шкафу управления. В ручном или автоматическом режиме позиционирование мундштука на стык листов производится с помощью световых точек от лучей датчиков лазерного слежения (зазор между листами при сварке без разделки должен быть 1,5...2 мм).

Сварочные процессы и оборудование



A1416



A1416-1



A1406



A1412

Рис. 8.30. Подвесные самоходные автоматы

8.9.2 СВАРОЧНЫЕ ГОЛОВКИ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ



Рис. 8.31. Сварочные головки для дуговой сварки: *а* – АД 231; *б* – ГДФ 1001



Рис. 8.32. Сварочный автомат АДФ-1000

Подвесной самоходный автомат АД 231, рис. 8.31, *а*, предназначен для выполнения широкого круга наплавочных и сварочных работ различными электродами. Может использоваться при наплавке тел вращения, а также плоских деталей, изделий сложной формы в наплавочных установках, станках и как самостоятельная единица.

Наличие колебательного устройства электрода позволяет вести наплавку проволокой и лентой на требуемую ширину. Сварочная головка ГДФ 1001, рис. 8.31, *б*, предназначена для дуговой сварки плавящимся электродом под слоем флюса поворотных стыков труб из углеродистой и низкоуглеродистой стали. Головка имеет механическое устройство, позволяющее отслеживать колебания трубы по диаметру.

Сварочный трактор АДФ-1000 (рис. 8.32) предназначен для автоматической сварки под флюсом на постоянном токе прямолинейных стыковых и угловых швов, швов в «тавр», нахлесточных швов с разделкой и без разделки кромок. Сварка осуществляется стальной электродной проволокой.

Сварочный автомат обеспечивает:

- Регулирование скорости подачи проволоки и скорости сварки – плавное.
- Плавное регулирование напряжения на дуге.
- Естественное охлаждение токопроводящей части сварочной головки и сопла.

Сварочные процессы и оборудование

- Стабилизацию скорости сварки и скорости подачи проволоки.
- Предварительную установку сварочного режима.
- Цифровую индикация величины сварочного тока и напряжения, скорости сварки, времени заварки кратера, времени растяжки дуги.
- Возможность сварки по направлениям «вперед» и «назад».
- Режимы «Наладка» и «Сварка».

Сварочный трактор АДФ-1250, рис. 8.33, предназначен для автоматической сварки под флюсом на постоянном токе стыковых и угловых швов, швов в «тавр», нахлесточных швов с разделкой и без разделки кромок. Швы могут быть прямолинейными и кольцевыми. Сварка осуществляется стальной электродной проволокой.

В процессе работы трактор передвигается по изделию или по уложенной на изделие рядом с изделием линейке.

Сварочный автомат обеспечивает:

- Регулирование скорости подачи проволоки и скорости сварки – плавное.
- Плавное регулирование напряжения на дуге.
- Стрелочная индикация сварочного тока, напряжения, скорости сварки (при комплектации блоком управления АДФ-1250) или цифровая индикация (при комплектации блоком управления БУ-20).
- Стабилизация скорости сварки и скорости подачи проволоки.
- Предварительная установка сварочного режима.
- Возможность сварки по направлениям «вперед» и «назад».
- Режимы «Наладка» и «Сварка».

Сварочные тракторы АДФ-1000 и АДФ-1250 имеют нескольких стартовых режимов в начале сварки: сварка вправо (сварка влево), поджиг в движении; сварка вправо (сварка влево), поджиг с места; сварка на месте и комплектуются универсальными источниками сварочного тока ВДУ-1250, ВДУ-1000.

Сварочный трактор АСУ-5, рис. 8.34, предназначен для сварки под флюсом угловых швов прямолинейных, криволинейных и кольцевых ребер жесткости. Высота ребер жесткости – более 170 мм. Минимальное расстояние между осями ребер жесткости – 450 мм. Радиус кривизны ребер жесткости более 2 м.



Рис. 8.33. Сварочный трактор АДФ-1250



Рис. 8.34. Сварочный трактор АСУ-5

Угол, определяющий взаимное положение ребер жесткости и корпусной конструкции, может меняться в пределах от 72° до 108° .

Ребра жесткости могут быть с поперечным сечением в виде «бульбообразного» профиля от №18 до №246 или таврового сечения.

Система управления трактором обеспечивает:

Регулирование скорости подачи проволоки и скорости сварки – плавное.

Стабилизацию скорости сварки и скорости подачи проволоки.

Предварительную установку сварочного режима.

Возможность сварки по направлениям «вперед» и «назад».

Режимы «Наладка» и «Сварка».

Нескольких стартовых режимов в начале сварки: сварка вправо (сварка влево), поджиг в движении; сварка вправо (сварка влево), поджиг с места; сварка на месте.

Сварочный трактор АСУ-5 комплектуется блоком управления, пультом управления, цифровой индикация величины сварочного тока и напряжения, скорости сварки.

Рекомендуемые источники питания – ВДУ-506С, ВС-600С, ВС-730С, ВДУ-1000, ВДУ-1250

8.10 ОБОРУДОВАНИЕ ФИРМЫ КЕМРРИ (ФИНЛЯНДИЯ)

Источники питания Kemppi (Финляндия) разработаны на основе транзисторных модулей типа IGBT и уже более 30 лет поставляется на территорию РФ и стран СНГ для различных отраслей промышленности.

Номенклатурный ряд оборудования позволяет решать широкий спектр производственных задач. Отличительными особенностями оборудования являются: надежность, экономичность и простота управления. Наличие всех этих факторов

позволяет увеличить производительность и качество работ при существенном сокращении издержек.

Фирма Kemppi поставляет следующее оборудование инверторного типа:

Minarc – компактные сварочные аппараты с источником питания для ручной дуговой сварки штучным электродом (ММА) на постоянном токе (DC) углеродистых сталей. Они рекомендованы для сварки штучными электродами диаметром до 3,2 мм.

Minarc Tig – портативная сварочная установка, предназначенная для ручной дуговой сварки штучными электродами (ММА) и аргонодуговой сварки (TIG) на постоянном токе углеродистых и нержавеющей сталей, цветных металлов, в том числе алюминиевых сплавов на переменном токе (AC).

Minarc Mig – компактный полуавтомат для механизированной сварки низкоуглеродистых сталей. Адаптивное управление позволяет подобрать оптимальный режим сварки конструкций из различных материалов и толщин. Рекомендован для монтажных работ с повышенными требованиями к качеству сварного соединения, весогабаритным параметрам и для ремонтных работ в автомастерских.

Master – компактный источник питания для ручной дуговой сварки штучными электродами (ММА) на постоянном токе (DC) углеродистых и нержавеющей сталей. Предназначен для работ на монтаже. Обеспечиваем высокое качество сварных соединений. Имеет малый вес.

MasterTig – сварочная установка с источником питания для ручной дуговой сварки штучными электродами (ММА), ручной аргонодуговой сварки (TIG) на постоянном токе (DC) углеродистых и нержавеющей сталей, цветных сплавов.

MasterTig MLS – компактная сварочная установка для сварки (ММА) и (TIG). Установка имеет панели MLS с расширенными возможностями управления сварочным процессом. Основное применение – пищевое производство, стройка и автомастерские.

Kempomat – промышленные полуавтоматы в моноблочном исполнении (подающий механизм и источник питания в одном корпусе) предназначенные для сварки MIG/MAG углеродистых и нержавеющей сталей, алюминиевых сплавов с DC.

Kempoweld – промышленные полуавтоматы со сварочным выпрямителем и отдельным подающим механизмом для сварки MIG/MAG углеродистых и нержавеющей сталей, алюминиевых сплавов. Установки рекомендованы для производств, в которых требуется значительное удаление подающего механизма от источника питания.

Kemract – серия малогабаритных полуавтоматов в моноблочном исполнении двух серий. Полуавтомат серии Kemract PULSE кроме синергетических программ имеет возможность проведения импульсной сварки. Рекомендован для сварки углеродистых сталей, сварки алюминия и нержавеющей сталей.

Weld Force – промышленные полуавтоматы с отдельным подающим механизмом для сварки MIG/MAG углеродистых и нержавеющей сталей, алюминиевых сплавов и сварки штучными электродами ММА с источником питания постоянного тока и повышенным ПВ. Предназначены для предприятий, производящих

сварку особо ответственных конструкций, где основными критериями выбора оборудования являются: низкое энергопотребление, весогабаритные показатели, плавная регулировка во всем диапазоне токов, наличие синергетических программ.

Fast Mig – промышленные полуавтоматы с отдельным подающим механизмом, предназначенные для MIG/MAG сварки углеродистых и нержавеющей сталей, алюминиевых сплавов. Функциональные параметры аналогичные полуавтоматам Weld Force.

Kemppi Pro Evolution – универсальные установки постоянного тока с повышенным ПВ, предназначенные для работы в особо тяжелых условиях штучными электродами, механизированной сварки, с использованием подающих механизмов Promig 501, 511, 530 и аргонодуговой сварки с высокочастотным осциллятором Protig 410.

Описание сварочного оборудования и его технические данные выпускаемого фирмами Финляндии, Германии, Швейцарии, США приведены в [4].

Контрольные вопросы

1. Укажите порядок выбора сварочного источника питания для дуговой сварки.
2. Какие ВАХ имеют сварочные источники питания для дуговой сварки.
3. Что такое нагрузочная характеристика и от чего она зависит.
4. Как устанавливается режим для ручной дуговой сварки.
5. Укажите порядок настройки системы «дуга-источник питания» по току при неизменном напряжении.
6. Укажите порядок настройки системы «дуга-источник питания» по напряжению при неизменном токе.
7. Что такое сварочный трансформатор.
8. Что такое сварочный выпрямитель.
9. Укажите, какое оборудование входит в состав системы для дуговой механизированной сварки в защитных газах.
10. Укажите, какое оборудование входит в состав системы для дуговой автоматической сварки.

Список использованных источников

1. Конюшков, Г.В. Специальные методы сварки давлением. Учебное пособие/ Г.В.Конюшков, Р.А. Мусин. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2009. – 639 с.
2. Ленивкин, В.А. Электротехнологические процессы и оборудование: учебное пособие / В.А. Ленивкин, Е.Л. Стрижаков, – Ростов н/Д, Издательский центр ДГТУ, 2007, – 266 с.
3. Ленивкин, В.А. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах /В.А. Ленивкин, Н.Г. Дюргеров, Х.Н. Сагиров /под редакцией Н.Г. Дюргерова -2-ое изд. , доп. М. 2013. – 368 с.
4. Ленивкин, В.А. Выбор источников питания для дуговой сварки; учебное пособие/ В.А. Ленивкин, С.В. Нескоромный, А.И. Никашин; под ред. В.А. Ленивкина. Ростов н/Д, 2013. – 188 с.
5. Котлышев, Р.Р. Сварка трением с перемешиванием. Монография/ Р.Р. Котлышев. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2012. – 135 с.
6. Чуларис, А.А. Технология сварки давлением /А.А. Чуларис, Д.В. Рогозин: Ростов-на-Дону, Феникс, 2006. – 221 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
Глава 1 Основные данные физики твёрдого тела о строении конструкционных материалов	5
1.1 Виды элементарных связей в твердых телах и монолитных соединениях	5
1.2 Кристаллические решетки металлов	8
Глава 2 Принципиальные схемы методов сварки давлением и области применения	10
2.1 Методы сварки давлением. Основные и дополнительные технологические параметры	10
2.2 Р- Процессы	12
2.2.1 Холодная сварка	12
2.2.2 Сварка взрывом	24
2.2.3 Магнитоимпульсная сварка	35
2.2.4 Вакуумно-термическая магнитоимпульсная обработка (ВТМИО)	41
Глава 3 Сварочные процессы с использованием давления и температуры	44
3.1 Ударная сварка в вакууме (УСВ)	41
3.2 Сварка через электрически взрывающиеся прослойки в вакууме (СВзП)	46
3.3 Индукционная сварка (ИС) металлов	49
3.3.1 Технология ИС	55
3.3.2 Сварочное оборудование для ИС	56
3.4 Индукционная сварка пластмасс	58
3.5 Высокочастотная сварка деталей одежды из синтетических тканей	61
Глава 4 Сварка в твёрдом состоянии	63
4.1 Ультразвуковая сварка	63
4.2 Сварка трением (СТ)	71
Глава 5 Диффузионная сварка (ДС) (Р, Т, А, f, t-процессы)	77
Глава 6 Электрическая контактная сварка и ее разновидности	97
Глава 7 Электродуговая сварка плавления	105
7.1 Процессы в электрической дуге	105
7.2 Способы зажигания дуги	117
7.3 Физико-технические основы дуговой сварки	119
7.4 Плавящиеся электроды для ручной дуговой сварки	127
7.5 Сварочные флюсы	137
7.6 Неплавящимся электроды для сварки в защитных газах	143
Глава 8 Выбор источников питания для дуговой сварки	146
8.1 Порядок выбора источников питания	146

Сварочные процессы и оборудование

8.2 Вольтамперные характеристики сварочных источников питания	147
8.3 Настройка режимов сварки	150
8.4 Настройка системы на заданный режим	153
8.5 Трансформаторы для ручной дуговой сварки	154
8.6 Источники постоянного тока	155
8.7 Установки для сварки плавящимся электродом в защитных газах	164
8.8 Установки для импульсно-дуговой сварки серии S Speedpulse	167
8.9 Оборудование для автоматической сварки	169
8.9.1 Подвесные самоходные сварочные автоматы	169
8.9.2 Сварочные головки для дуговой сварки	171
8.10 Оборудование фирмы Kemppi (Финляндия)	173
Список использованных источников	176