



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЦЕНТР ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Машины и автоматизация сварочного
производства»

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВАРОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК



Автор
В.Ф. Лукьянов

Ростов-на-Дону, 2012



Аннотация

В учебном пособии рассмотрены основы проектирования сварных соединений конструкций, работающих под действием статических нагрузок.

Содержание учебного пособия гармонизировано с программой аналогичного курса, читаемого при подготовке по программе «Международный инженер сварочного производства (IWI)». В пособии изложены подходы к проектированию сварных соединений, используемые в различных отечественных и международных нормативных документах, в частности, в нормах СНиП II-23-81, «Еврокод 3», «DNV», «DIN 18800», AWS D1.1 и др.

Учебное пособие предназначено для использования студентами технических университетов при изучении дисциплин профильной подготовки бакалавров по направлению 150700 «Машиностроение», а также при изучении дисциплины «Проектирование сварных конструкций» специальности 150202 «Оборудование и технология сварочного производства».

Автор

В.Ф. Лукьянов - проф., д.т.н





Оглавление

Введение	5
1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	7
2. МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	18
2.1. Общие характеристики конструкционных материалов	18
2.2. Металлические материалы для сварных конструкций	26
2.3. Неметаллические материалы для сварных конструкций	40
2.4. Виды исходных заготовок для сварных конструкций	49
Вопросы для самопроверки	58
3. ТИПЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ	59
3.1. Сварные швы и соединения, выполняемые сваркой плавлением	59
3.2. Сварные швы и соединения, выполняемые контактной сваркой	67
3.3. Сварные швы соединений из двухслойных коррозионно-стойких сталей	70
3.4. Сварные соединения изделий из термопластов	71
3.5. Условные обозначения сварных соединений на чертежах	79
Вопросы для самопроверки	90
4. РАСЧЕТ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ	91
4.1. Основы проектирования сварных соединений	91
4.2. Обоснование необходимого запаса при расчете на прочность	93
4.3. Типы сварных соединений	101
4.4. Расчет сварных стыковых соединений	104
4.5. Расчет сварных соединений с угловыми швами	106
3.6. Соединения, выполненные под углом	110
4.7. Расчет соединений с учетом направления	



Машины и автоматизация сварочного производства

действия силы.....	111
4.8. Расчет тавровых соединений, выполненных с разделкой кромок	117
4.9. Расчет тавровых соединений с учетом возможного расслоения основного металла	119
4.10. Технологические ограничения минимального размера катета шва	121
4.11. Расчет элементов сварных конструкций с угловыми швами	123
4.11.3. Расчет сварных соединений с угловыми швами под действием момента в плоскости, перпендикулярной плоскости расположения швов.....	128
4.11.4. Расчет поясных швов балок	130
4.12. Расчет элементов сварных конструкций с точечными швами	132
Контрольные вопросы	135
5. СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ	137
5.1. Общая характеристика конструкций, работающих под давлением.....	137
5.2. Расчет выпуклых и плоских днищ сосудов	144
5.3. Укрепление отверстий в обечайках и днищах	149
5.4. Особенности расчета прочности сварных трубопроводов	156
Контрольные вопросы	158

ТЕСТЫ

[Вариант 1](#)

[Вариант 2](#)

[Вариант 3](#)

[Вариант 4](#)

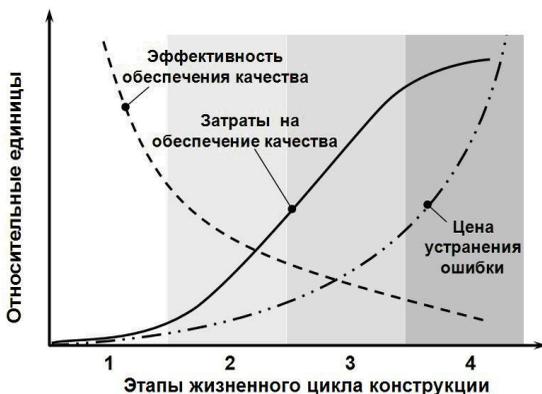
[Вариант 5](#)



ВВЕДЕНИЕ

Конечной целью инженерной деятельности специалиста сварочного производства является обеспечение качества выпускаемой продукции и снижение затрат на ее производство при обеспечении безопасных условий труда. Эффективность принимаемых технических решений существенно зависит от того, на каком этапе жизненного цикла сварной конструкции принимаются эти решения.

Жизненный цикл сварной конструкции включает несколько этапов: проектирование, разработка технологии изготовления, изготовление конструкции, ее эксплуатация (рисунок).



Эффективность принятия решения
на различных этапах жизненного цикла конструкции:
1 – проектирование; 2 – разработка технологии;
3 – изготовление; 4 – эксплуатация

Очевидно, что наибольшая эффективность обеспечения качества сварной конструкции может быть достигнута на стадии проектирования конструкции, когда можно предусмотреть и исключить негативное влияние технологии сварки на свойства сварного соединения. Кроме того, на этом этапе материальные затраты на принятие решения минимальны. По мере продвижения по жизненному циклу увеличиваются затраты на обеспечение качества и растет цена ошибки решения, принятого на стадии проектирования. Решения, принятые на стадии проектирования, во многих случаях определяют эффективность производства и эксплуатации конструкции. Именно по этой причине основной целью, которую должен ставить перед собой специалист сварочного производства при проектировании сварных конструкций, является обеспечение качества и снижение затрат на



Машины и автоматизация сварочного производства

производство.

При проектировании сварных конструкций должны быть решены следующие задачи:

- обеспечение прочности сварных соединений, работающих в составе конструкции;
- обеспечение надежности и работоспособности сварных соединений с учетом условий эксплуатации конструкции;
- обеспечение технологичности конструкции на всех этапах ее жизненного цикла;
- удовлетворение специальных требований к сварным соединениям и конструкциям (например, требования к магнитным свойствам, к коэффициенту температурного расширения металла шва и основного металла и др.).

Во многих случаях специалист сварочного производства не принимает непосредственное участие в проектировании сварных конструкций, но, являясь узким специалистом, он может и должен оказывать влияние на принятие конструктором решений с тем, чтобы предотвратить ошибки, которые придется устранять на более поздних стадиях: при разработке технологии и при изготовлении. Кроме того, специалист сварочного производства должен четко представлять, к каким последствиям в отношении прочности и надежности сварной конструкции могут привести его неправильные действия как технолога.

Именно в этом представляется основная цель изучения дисциплины «Проектирование сварных конструкций» студентами при профильной подготовке бакалавров по направлению 150700 «Машиностроение», а также специалистов специальности 150202 «Оборудование и технология сварочного производства».

Решить эти проблемы может только специалист, хорошо подготовленный теоретически и умеющий применять эти знания на практике, ибо "увлекающийся практикой без науки - словно кормчий, ступающий на корабль без руля и компаса, он никогда не уверен, куда «приплывет» (Леонардо да Винчи).

После изучения дисциплины «Проектирование сварных конструкций» будущий инженер должен иметь знания и умения, необходимые для участия в проектировании сварных конструкций в качестве **эксперта**, способного дать оценку технологических возможностей изготовления конструкции и обеспечения требуемых характеристик прочности и надежности сварных соединений.

Будущий инженер должен **знать**: область применения, технические и экономические преимущества сварных конструкций; материалы, применяемые для сварных конструкций и возможные изменения их механических свойств под влиянием термомеханического цикла сварки; методы расчета сварных соединений в зависимости



Машины и автоматизация сварочного производства

от условий их работы в конструкции; методы оценки напряженно-деформированного состояния различных зон сварного соединения; механизм образования напряжений и деформаций при сварке и приемы устранения их негативного влияния на работоспособность конструкции; методы оценки и приемы обеспечения заданного уровня прочности и надежности сварных соединений; приемы обеспечения технологичности конструкции на стадии ее проектирования; компьютерные методы моделирования и анализа при проектировании сварных соединений;

должен **уметь**: произвести расчет прочности сварного соединения и составить технологическую часть задания на проектирование сварной конструкции; оценить принятые при проектировании конструкции решения с позиции обеспечения прочности, надежности и технологичности сварных соединений и внести обоснованные предложения, направленные на их совершенствование; проводить исследования работоспособности сварных соединений.

Изучение дисциплины «Проектирование сварных конструкций» базируется на знаниях, полученных при изучении предшествующих дисциплин: «Сопrotивление материалов»; «Детали машин и основы конструирования»; «Теория сварочных процессов»; «Технологические основы сварки плавлением и давлением».

Полученные при изучении данной дисциплины знания послужат основой для дальнейшего формирования специалиста сварочного производства и будут углублены при последующем изучении дисциплин: «Производство сварных конструкций»; «Материалы и их поведение при сварке».

1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Способ получения неразъемных соединений деталей путем сварки был известен людям еще в глубокой древности. Первым способом получения неразъемных соединений был кузнечная сварка. Прежде всего, кузнечная сварка служила для увеличения размеров заготовок. При изготовлении медных бус концы изогнутой на круглой оправке полосы соединяли внахлестку и сваривали кузнечным способом. Сварку меди применяли не только для изготовления вещей, но и для их починки, наращивания изношенных краев.

Особенно высокого развития и большого разнообразия достигает техника получения неразъемных соединений металлов в железном веке. Древнейшие изделия из железа, относящиеся к IV тыс. до н. э., были обнаружены в Египте.

В VIII–VII вв. до н. э. в Восточной Европе появляются



Машины и автоматизация сварочного производства

биметаллические мечи и кинжалы, при изготовлении которых соединяли бронзу и железо (рис. 1.1).

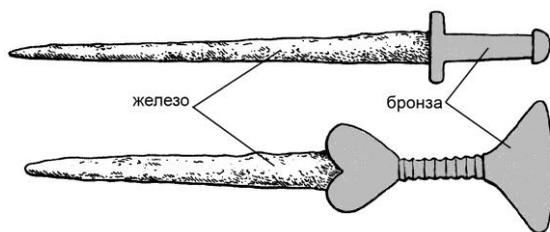


Рис. 1.1. Биметаллический сварной меч

В скифскую эпоху (VII–III вв. до н. э.) была освоена кузнечная сварка деталей из сталей с разным содержанием углерода с целью улучшения качества лезвия режущих и рубящих орудий. Сочетание в конструкции режущего инструмента (меч, клинок, топор) твердой сердцевины (высокоуглеродистая сталь) и мягкого поверхностного слоя (низкоуглеродистая сталь) не только способствовало повышению прочности, но и обеспечивало появление эффекта самозатачивания лезвия. Таким образом, было реализовано главное преимущество применения сварки: возможность получения конструкции, в которой свойства отдельных участков соответствовали их эксплуатационному назначению.

Интересна технология изготовления оружейных стволов с помощью кузнечной сварки, получившая развитие в конце 15 века. Выкованный из крицы¹ железный лист скручивали на железной оправке в трубу и сваривали продольным швом внахлестку. Затем на эту трубу наваривали еще одну или две трубы большего диаметра, следя за тем, чтобы продольные сварные швы располагались в разных местах. Выкованные таким образом трубы-заготовки были короткими. Поэтому для получения достаточно длинного ствола орудий несколько таких заготовок соединяли между собой при помощи сварки. Для этого соответствующие концы труб выковывали в виде внутреннего или наружного конуса, соединяли и сваривали внахлестку. В казенную часть ствола вваривали коническую железную заглушку. Исследования микроструктуры сварных швов древнерусских пищалей XV в. показали, что качество сварки было достаточно высоким.

В XIX в. кузнечная сварка в промышленности была механизирована. Ручной труд молотобойца заменяется работой машин, меха-

¹ Твердая губчатая масса железа с малым содержанием углерода, серы, фосфора, кремния со шлаковыми включениями, заполняющими поры. В древние времена исходный материал для получения железных изделий.



Машины и автоматизация сварочного производства

ническими молотами с весом бойка до 1 т, производящими от 100 до 400 ударов в минуту. Технология кузнечной сварки также была усовершенствована. Кузнечную сварку использовали для получения биметаллических листов. Листы разнородных металлов собирали в пакет, который нагревали в печах и пропускали через валки прокатного стана. Следует отметить, что этот способ получения биметаллического листа сохранился до наших дней.

Широко применялась кузнечная сварка в производстве сварных стальных труб с прямолинейным продольным нахлесточным швом. Кромки листовой заготовки предварительно скашивали, нагревали в печи, затем прокатывали на сердечнике. Таким способом изготавливали трубы диаметром от 40 мм до нескольких сотен миллиметров. Помимо прямошовных изготавливали и спирально-шовные трубы диаметром до 600 мм. Для повышения производительности сварки и качества сварного соединения начали применять кузнечную сварку с нагревом кромок горелками, работавшими на водяном газе с воздухом. Нагретые кромки сваривали проковкой механическими молотами или прокаткой нажимными роликами.

Следует обратить внимание на то, что с момента «становления» сварки как технологического процесса, она была направлена на решение основных задач, актуальных и в настоящее время:

- обеспечение возможности получения крупных конструкций из мелких компонентов;
- соединение материалов с различными свойствами в одной конструкции;
- ремонт и восстановление отдельных участков конструкций;
- снижение трудоемкости изготовления конструкции.

В конце XIX в. и в начале XX в. на основе достижений в области физики и электротехники наблюдается интенсивное развитие технологий сварки. За короткий срок был создан ряд новых способов сварки, являющихся основой сварочной техники и в наше время.

Источником нагрева для самого распространенного до настоящего времени вида сварки служит электрическая дуга. Честь открытия явления электродугового разряда принадлежит русскому ученому академику В.В. Петрову. Однако возможность практической реализации технологического процесса дуговой сварки появилась благодаря работам русских изобретателей Н.Н. Бенардоса и Н.Г. Славянова.

Николай Николаевич Бенардос предложил и осуществил в 1880–1890 гг. дуговую сварку неплавящимся электродом дугой прямого и косвенного действия; в 1887 г. он предложил основные виды электроконтактной сварки: точечную и роликовую.



Машины и автоматизация сварочного производства

Николай Гаврилович Славянов в конце 1880-х годов осуществил и широко внедрил электродугую отливку металлических изделий и сварку плавящимся металлическим электродом, разработал основы металлургии сварочного процесса и, в частности, предложил вести сварку под шлаковой защитой. Он создал первый в мире автомат для дуговой сварки металлов плавящимся электродом, так называемый «плавильник Славянова».

Изобретения Н.Н. Бенардоса и Н.Г. Славянова получили мировое признание, они были запатентованы во многих промышленных странах Европы и в Америке. Возможности дуговой сварки плавлением были высоко оценены на выставках в России, на Всемирных выставках в Чикаго и Париже. В 1893 г. на Всемирной выставке в Чикаго Н.Г. Славянов был награжден дипломом и золотой медалью за изобретение электродуговой сварки металлов.

Работы Н.Н. Бенардоса и Н.Г. Славянова, наглядно демонстрировавшие преимущества технологии электрической сварки перед другими способами соединения металлов, послужили толчком к широкому распространению этого технологического процесса и росту темпов объема его применения.

С 1890 по 1892 г. в мастерских Пермских пушечных заводов сваркой было отремонтировано 1631 изделие общим весом 16 953 пуда. Вес наиболее тяжелой детали достигал 425 пудов. Израсходовано электродов 685 пудов, расплавленных за 887 ч.

Несмотря на значительные успехи русских изобретателей и инженеров в деле разработки и внедрения дуговой электросварки, к началу XX в. промышленно развитые страны Европы и США начали опережать Россию по объему применения сварки. Появляются новые способы сварки: сварка покрытым электродом (Oscar Kjellberg, 1907 г.).

Первую кислородно-ацетиленовую сварочную горелку сконструировал французский инженер Э. Фуше, который получил на неё патент в Германии в 1903 г. В России этот способ стал известен предположительно к 1905 г., а получил распространение к 1911 г.

Сварка начинает находить применение не только при ремонте, но и для изготовления и монтажа крупных конструкций. В Швеции появилась плавучая сварочная мастерская "ESAB – IV", предназначенная для ремонта морских судов (1907 г.)². В США (Филадельфия) предпринимаются попытки проложить с использованием кислородно-ацетиленовой сварки трубопровод длиной 11 миль (1911 г.); спустя год на одном из автомобильных заводов США применили точечную сварку для соединения деталей корпуса автомобиля. В 1918 г.

² Фирма ESAB в настоящее время является ведущим в мире производителем сварочного оборудования и сварочных материалов.



Машины и автоматизация сварочного производства

морской регистр Лойда дает разрешение на применение дуговой сварки в судостроении. В 1920 г. был спущен на воду сухогруз "Fulagar" водоизмещением 421 т.

Сварку применяют при строительстве эстакад, мостов, резервуаров, сферических газгольдеров, протяженных трубопроводов, в том числе паропроводов.

Широкому распространению сварных конструкций в Советском Союзе способствовали работы Д.А. Дульчевского, Е.О. Патона, В.П. Вологодина, Г.А. Николаева, Н.О. Окерблома. В 30-х годах XX-го столетия сварка начала успешно вытеснять другие способы соединения деталей, особенно соединения на заклепках, в крупных строительных конструкциях, таких, как автодорожные и железнодорожные мосты. Были спроектированы и построены мосты с пролетом 45 м, затем 87,6 м.

К концу 20-х годов XX столетия сварочное производство постепенно становится самостоятельной отраслью. Дальнейшее ее развитие требовало разработки специальных правил проектирования и изготовления сварных конструкций; неразрушающих методов контроля качества сварных соединений.

Появляются стандарты «Испытание сварных швов» (1921 г.); «Правила конструирования сварных котлов» (1925 г.); «Правила сварки плавлением и газовой резки при строительстве зданий» (1928 г., США); «Правила Американского сварочного общества³, обозначения сварных швов на чертежах» (1929 г.); были внесены изменения в Boiler Code (свод правил проектирования и изготовления котлов и сосудов Американского общества инженеров механиков), утвердившие правила применения радиографического контроля сварных соединений (1931 г.); стандарт на сварочные электроды (1935 г., Великобритания). В 1933 г. была издана монография «Методы расчета электросварных соединений» (Г.К. Татур, Н.Н. Рыкалин). В том же году фирма Lincoln Electric Co. публикует справочник по проектированию сварных соединений и применению дуговой сварки (Procedure Handbook of Arc Welding Design and Fabrication).

В 1936 г. Американское сварочное общество (AWS) выпускает документ, регламентирующий проектирование, сооружение, реконструкцию и ремонт автомобильных и железнодорожных мостов с применением сварки плавлением. В том же году AWS подготовило документ «Временные правила оценки сварочных процессов и испытания

³ American welding society (AWS) – Американское сварочное общество, играет ведущую роль в координации сварочного производства США и активно влияет на развитие производства сварных конструкций во всем мире.



Машины и автоматизация сварочного производства

операторов-сварщиков» (Tentative Rules for the Qualification of Welding Processes and Testing of Welding Operators).

Во второй половине XX века сварка заняла одно из лидирующих мест среди технологических процессов благодаря своим уникальным возможностям соединять практически любые металлы и неметаллические материалы. Сваркой в мире занято не менее 5 млн. человек, из них 70–80% на электродуговых процессах.

Более половины валового национального продукта промышленно развитых стран создается с помощью сварки и родственных технологий, к которым относят наплавку, пайку, резку, нанесение покрытий, склеивание различных материалов. Долю различных способов соединения деталей, применяемых в промышленности и строительстве, иллюстрирует рис. 1.2.

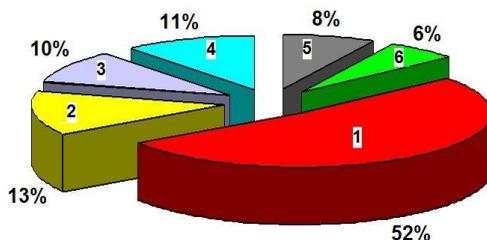


Рис. 1.2. Доля способов соединения деталей:
 1 — сварка; 2 — пайка; 3 — склеивание; 4 — механические соединения;
 5 — другие способы; 6 — нанесение покрытий

Только в России общий объем сварных металлических конструкций достигает 800 млн. т. До 2/3 мирового потребления стального проката идет на производство сварных конструкций и сооружений. Толщина свариваемых деталей колеблется от микронов до метров, масса сварных конструкций — от долей грамма до сотен и тысяч тонн. Зачастую сварка является единственным возможным или наиболее эффективным способом создания неразъемных соединений конструкционных материалов и получения заготовок, максимально приближенных к оптимальной форме готовой детали или конструкции.

Масштабы применения сварки при сооружении современных конструкций характеризуют следующие примеры. В 1976г. в США (фирма Дженерал Дайнэмикс) было завершено строительство сферического газгольдера из алюминиевого сплава, установленного на специальном танкере для транспортировки природного газа. Диаметр газгольдера составлял 36 м, длина сварных швов 48,6 миль, вес на-



Машины и автоматизация сварочного производства

плавленного металла 3166 кг.

В мире проложено около 1 млн. км сварных газопроводов, например, протяженность трубопровода, проложенного в 1975 г. на Аляске, 798 миль, диаметр 1220 мм. На строительстве трубопровода было занято 17 000 человек – 6% населения Аляски. Сварено 38 000 сварных стыков. Израсходовано 36 000 кг сварочной проволоки. В 2002 г. завершено строительство газопровода «Голубой поток» (Россия – Турция). Протяженность сухопутной части трубопровода составила 1140 км, диаметр 1220 мм. По дну Черного моря проложено две нитки трубопровода из труб диаметром 596 мм. Протяженность каждой нитки морской части – 396 км. В 2011 году пущен в действие самый протяженный в мире морской газопровод «Северный поток» – длина трубы составила 1224 км. Протяженность нефтепровода Восточная Сибирь – Тихий океан около 4200 км.

Сварные конструкции широко используются в строительстве крупных сооружений, например, современных крытых стадионов, высотных зданий. Печально известные башни близнецы Всемирного торгового центра в Нью-Йорке содержали 176 000 т стальных сварных конструкций. При сооружении 100-этажного здания в Чикаго было израсходовано почти 140 т сварочных материалов, причем только на монтаже было наплавлено 74,25 т металла. Благодаря применению сварки в среде CO₂ порошковой проволокой производительность сварки достигала 40,5 кг наплавленного металла в день на одного оператора. При сооружении высотного здания штаб-квартиры Bank of America в Сан-Франциско с помощью электрошлаковой сварки было выполнено 24 000 швов.

Металлоконструкции Бережковского мостового перехода через реку Москву, русловая часть которого состоит из двух автономных неразрезных пролетных строений длиной по 365 м и шириной 21 и 17 м с общей массой около 7 тыс. тонн, имеют 18 км сварных швов, из них 11,5 км швов выполнены автоматической сваркой.

Примером гигантских сварных конструкций, работающих в сложных условиях нагружения, являются раздвижные крыши и навесы над стадионами. Над трибунами Большой спортивной арены в Лужниках на 72 колоннах укреплен козырек массой 15 тыс. тонн.

Покрытие представляет собой пространственную систему, состоящую из внутреннего и наружного овалобразного контуров и системы радиально-кольцевых ребер, размеры главных осей 247,8x308,6 м. Стрела подъема куполообразного покрытия составляет 23,4 м, а расстояние от низа конструкции до поля стадиона – 35м.



Машины и автоматизация сварочного производства

Общий периметр наружного контура покрытия достигает 895 м, вылет пространственного козырька – 63,5 м. Наружный контур образован из коробчатых блоков замкнутого сечения 2х5 м. Внутренний контур решен в виде сквозной пространственной системы трапециевидной формы высотой 10 м, шириной 6 и 3 м (в нижней части).

Сварка находит все новые и новые области применения, например, в архитектуре или при сооружении скульптурных композиций. Сделаны первые попытки осуществления сварки в космосе. Дуговая сварка плавящимся электродом стала одним из трех способов, испытанных в 1969 г. на космическом корабле «Союз-6» космонавтом В. Кубасовым. В 1984 г. космонавт Светлана Савицкая удачно опробовала электроннолучевую сварку в открытом космосе, используя ручной пистолет.

Реальностью стало применение сварки в медицине – сварка сетчатки глаза, сварка и резка костей, других биологических тканей. Разработана технология микроплазменной сварки сердечных клапанов.

Сварные конструкции работают при сверхвысоких и сверхнизких температурах, при высоких давлениях и в условиях космического вакуума.

В последние десятилетия наметились существенные изменения в структуре способов сварки, используемых при производстве сварных конструкций. Резко возросло применение сварки в защитных газах (в CO₂, аргоне, смеси активных газов), в основном за счет сокращения объемов применения ручной дуговой сварки. В связи с интенсивным развитием электронной промышленности и компьютерных технологий во всем мире растет применение промышленных роботов в сварочном производстве.

В 2001 г. во всем мире находилось в эксплуатации более 1 млн. промышленных роботов. В настоящее время промышленные роботы стали неотъемлемой частью сварочного производства в автомобильной промышленности.

Исследования, проведенные французскими специалистами, показали, что, если в настоящее время исключить из производства роботизированные системы, то стоимость автомобилей повысится на 20 процентов. По данным японских автомобилестроительных фирм, производительность труда при автоматизации сварочных процессов за счёт внедрения сварочных роботов повысилась за 10 лет примерно в 4 раза.

Широкое распространение механизированных и



Машины и автоматизация сварочного производства

тизированных методов сварки требует разработки специальных методов проектирования сварных конструкций и соединений, учитывающих специфику применяемых методов сварки. Например, применение электрошлаковой сварки требует вертикального расположения сварных соединений; применение автоматической сварки под флюсом предопределяет необходимость расположения швов в нижнем положении; применение неадаптивных промышленных роботов для дуговой сварки заставляет конструктора просчитывать размерные цепи с тем, чтобы гарантировать движение робота по стыку.

Несмотря на то, что к началу XXI века сварочное производство достигло значительных успехов как в отношении уровня механизации и автоматизации работ, так и в отношении качества выпускаемой продукции, сварное соединение по-прежнему остается «слабым звеном» конструкции.

На долю сварных соединений, как правило, приходится несколько сотых долей массы всей металлической конструкции, но именно сварные соединения нередко (по некоторым данным до 10–35 % случаев) являются источником разрушения конструкций. Например, частота разрушений нефтепроводов в Западной Европе составляет 0,55 случаев на 1000 км в год. Как показывает практика, последствия таких разрушений могут быть достаточно серьезные.

Одной из основных причин разрушения сварных конструкций является появление дефектов при выполнении сварных соединений, создающих концентрацию напряжений. К сожалению, современное состояние сварочных технологий не позволяет реализовать на практике концепцию «6-sigma quality», т.е. когда 99,999% сварных соединений соответствует нормативным требованиям к качеству.

Радиографический контроль 30 000 швов магистрального трубопровода, проходящего через Аляску, выявил 4000 сварных соединений, содержащих дефекты, размеры которых превышают требования норматива API 1104 (стандарт Американского нефтяного института – один из основных стандартов, признанных в мировой практике строительства магистральных трубопроводов).

Следует отметить, что присутствие в конструкции дефектов сварки далеко не всегда является единственной причиной ее разрушения. Благодаря тому, что современные материалы обладают высокой пластичностью, концентрация напряжений около дефектов существенно снижается, что уменьшает их опасность. Известны случаи достаточно длительной службы сварной конструкции, содержащей наиболее опасные дефекты – трещины. Разрушение конструк-



Машины и автоматизация сварочного производства

ций, как правило, является следствием сочетания нескольких неблагоприятных факторов, к числу которых можно отнести ошибки проектировщика, недостаточная изученность условий эксплуатации, изменение механических характеристик металла с течением времени, технологическая наследственность сварных соединений, выражающаяся в ухудшении механических свойств металла в результате протекания термомодеформационных процессов при сварке.

Недостаточная изученность роли технологической наследственности сварных соединений иногда ставит под сомнение целесообразность использования технологических процессов сварки даже несмотря на очевидную их экономическую целесообразность. Так, например, в 1977 г. Управление федеральными автомобильными дорогами США ввело ограничение на применение электрошлаковой сварки при изготовлении мостовых конструкций после обнаружения трещин при обследовании автомобильного моста в Питтсбурге. Вероятно, в данном случае основную роль сыграл тот факт, что электрошлаковая сварка сопровождается большим вводом тепла, малой скоростью охлаждения металла шва и околшовной зоны, что может вызывать рост зерна и снижение запаса пластичности.

На отрицательную роль технологической наследственности сварных соединений обратили внимание еще на стадии формирования сварки как самостоятельного технологического процесса. Проведенные в 20–30-е гг. прошлого столетия научные исследования показали, что контакт кислорода и азота с расплавленным металлом может привести к охрупчиванию металла шва и появлению пористости, а наличие водорода в сварочных электродах способствует появлению трещин при сварке.

Исследования, проведенные в 60–70 гг., убедительно доказали, что прочность сварной конструкции далеко не всегда соответствует прочности материала, из которого она изготовлена. Чем выше прочность конструкционного материала, тем выше вероятность такого несоответствия. Причины этого тесно связаны с вопросами технологической наследственности сварных соединений и с тем фактом, что повышение прочности конструкционного материала, как правило, сопровождается снижением его запаса пластичности. Теоретическое и экспериментальное изучение этого эффекта привело к разработке



Машины и автоматизация сварочного производства

теории конструкционной прочности сварных соединений⁴. В более поздние годы методы проектирования, основанные на идеологии конструкционной прочности, названные "Structural Integrity", получили широкое распространение на Западе.

Очевидно, что не учитывать роль технологической наследственности сварных соединений означает формально подходить к вопросам обеспечения надежности и работоспособности проектируемой сварной конструкции. Более того, на стадии проектирования необходимо и возможно создать предпосылки того, чтобы свести к минимуму неблагоприятную роль технологической наследственности сварных соединений. Опытный специалист по проектированию сварных конструкций, используя методы конструктивно-технологического проектирования⁵, когда одновременно с проектированием сварных соединений решаются вопросы оптимизации технологического процесса, может активно влиять на принятие технологических решений.

Именно идеология конструкционной прочности сварных соединений и методы конструктивно-технологического проектирования должны стать основой при изучении дисциплины «Проектирование сварных конструкций».

Вопросы для самопроверки

1. С какой целью использовали сварку в древние времена?
2. Какой способ сварки преобладал до конца XIX века?
3. Кто из российских ученых стоял у истоков современных технологий сварки?
4. Какие преимущества сварочных технологий способствовали широкому распространению сварки во всем мире?
5. Приведите примеры крупных сварных конструкций, построенных в XXI веке.
6. Что такое технологическая наследственность сварных соединений?

⁴ В Советском Союзе теория конструкционной прочности сварных соединений разработана школой МВТУ им. Н.Э. Баумана под руководством профессора С.А. Куркина.

⁵ Методология конструктивно-технологического проектирования была заложена работами профессора О.А. Очерблома в 70-х годах прошлого века.



2. МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

2.1. Общие характеристики конструкционных материалов

Номенклатура конструкционных материалов и объем их применения изменяются с развитием технологических возможностей цивилизации в направлении наибольшего удовлетворения потребностей человека. Если обратиться к рис. 2.1, можно видеть, что набор конструкционных материалов, используемых на заре человечества, и объем применения материалов различных структурных классов в настоящее время существенно отличается.

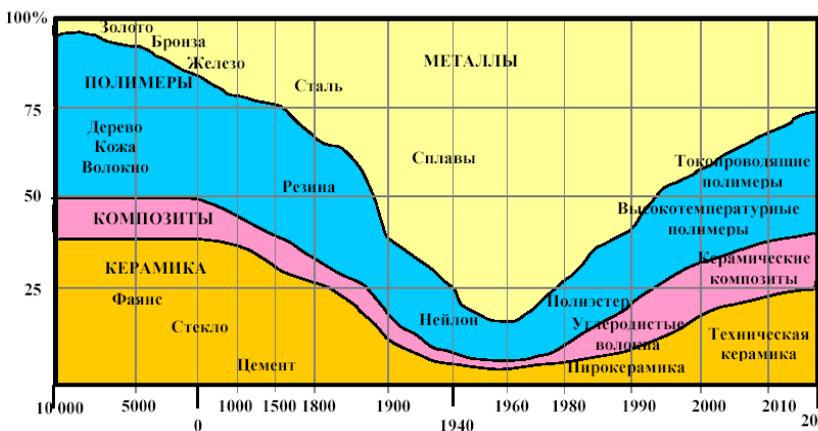


Рис. 2.1. Тенденции развития конструкционных материалов

До новой эры преобладало использование природных полимеров (дерево, кожа, волокно), керамики естественного происхождения (фаянс, стекло, позже цемент). Из металлов использовались в основном только золото и бронза. С появлением железа и развитием технологических возможностей его переработки металлы все шире находят применение как конструкционный материал и интенсивно вытесняют другие конструкционные материалы. К 40–60-м гг. XX столетия объем использования сплавов на металлической основе достиг 90%. В более поздние годы в связи с возросшими требованиями-



Машины и автоматизация сварочного производства

ми к конструкционному материалу наметилась тенденция к росту применения неметаллических материалов, таких как полимеры, композиты, керамика. К началу XXI века объем применения металлических материалов сократился до 35–45 %. Благодаря широкому разнообразию неметаллических материалов, благоприятному сочетанию их механических и физико-химических свойств, а также успешному освоению и наращиванию их промышленного выпуска неметаллические материалы находят все новые и новые области применения. Соотношение различных типов конструкционных материалов, применяемых в настоящее время, показано на рис. 2.2.

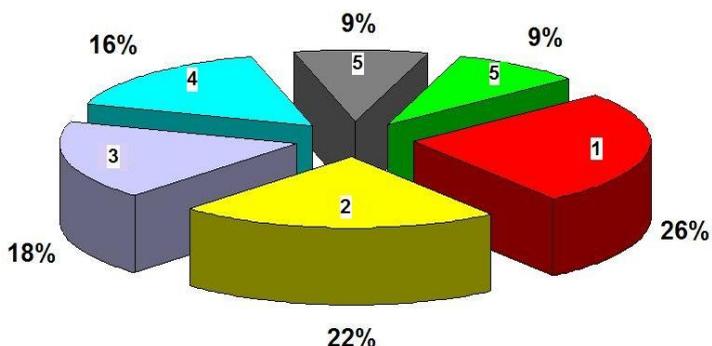


Рис. 2.2. Относительный объем применения различных конструкционных материалов (по данным Немецкого сварочного общества DVS):

1 – стали; 2 – легкие сплавы; 3 – композиты; 4 – пластмассы;
5 – стекло (керамика); 6 – другие материалы

Условия эксплуатации современных сварных конструкций нередко выдвигают требования по хладостойкости, теплостойкости или коррозионной стойкости конструкционного материала, допустимому весу конструкции, ряд других специальных требований. Очевидно, что эти требования могут приходиться в противоречие с технологическими возможностями конкретного производства, а затраты на преодоление технических трудностей получения материала и его последующей обработки могут оказаться непомерными.

Поэтому выбор конструкционного материала для сварной конструкции в большинстве случаев основан на компромиссе между требованиями, обусловленными техническими требованиями к конструкции и спецификой ее эксплуатации, с одной стороны, техниче-



Машины и автоматизация сварочного производства

скими возможностями ее изготовления из выбранного материала и ценой затрат на создание конструкции, удовлетворяющих поставленным задачам, с другой.

Несмотря на то, что выбор материала в значительной мере зависит от условий эксплуатации конструкции, при принятии решения всегда необходимо учитывать во внимание следующие характеристики: прочность, главным образом удельная прочность⁶, пластичность, технологичность, в частности свариваемость, и стоимость.

Значимость такой характеристики, как удельная прочность конструкционного материала, очевидна. С ее повышением не только сокращается расход материала, но также сокращаются эксплуатационные затраты, особенно в тех случаях, когда нагрузка от собственного веса конструкции составляет значительную долю общей нагрузки. К таким конструкциям, прежде всего, относятся летательные аппараты аэрокосмического комплекса, глубоководные аппараты, а также большепролетные мосты.

На рис 2.3 в качестве примера показаны возможности освоения глубин мирового океана в зависимости от прочностных характеристик конструкционного материала.

Можно видеть, что возможности достижения больших глубин зависит не только от прочности материала, но и от его плотности, определяющей весовые характеристики конструкции при заданном уровне прочности. Идеи создания глубоководных аппаратов из высокопрочных сталей, титановых сплавов и стеклопластика уже реализованы как в нашей стране, так и за рубежом.

⁶ Удельная прочность материала характеризуется отношением его предела прочности к плотности.



Машины и автоматизация сварочного производства



Рис. 2.3. Возможности освоения океанских глубин аппаратами, изготовленными из материалов с различной удельной прочностью: 1 – сталь: $\sigma_{02} = 780$ МПа, $\rho = 7,8$ Г/см³; 2 – сталь: $\sigma_{02} = 840$ МПа, $\rho = 7,8$ Г/см³; 3 – сталь: $\sigma_{02} = 1400$ МПа, $\rho = 7,8$ Г/см³; 4 – титановый сплав: $\sigma_{02} = 840$ МПа, $\rho = 4,5$ Г/см³; 5 – титановый сплав: $\sigma_{02} = 1050$ МПа, $\rho = 4,5$ Г/см³; пунктирной линией показано распределение глубин мирового океана, а столбиками – возможная глубина погружения глубоководного аппарата в зависимости от типа конструкционного материала и его удельной прочности

Борьба за повышения прочности конструкционных материалов ведется непрерывно. Предельная прочность материала оценивается как $(0,05-0,1)E$, где E – модуль упругости материала. Возможность достижения предельной прочности доказана экспериментально, но в практике сварных конструкций пока находят применение материалы гораздо меньшей прочности. В табл. 2.1 приведены прочностные характеристики для трех наиболее распространенных групп металлических сплавов, которые могут быть реализованы в сварных конструкциях без применения упрочняющей термообработки всей конструкции после сварки.



Таблица 2.1

Удельная прочность сварных соединений различных групп традиционных металлических конструкционных материалов

Металлические сплавы	Теоретическая прочность,	Модуль упругости,	Предел прочности,	Плотность, Г/см ³	Удельная ⁷ прочность, м
	МПа				
Сплавы на основе железа	14000	$2,1 \cdot 10^5$	1050	7,8	$1,35 \cdot 10^4$
Алюминиевые сплавы	4200	$0,7 \cdot 10^5$	520	2,7	$1,9 \cdot 10^4$
Титановые сплавы	9000	10^5	1400	4,5	$3,1 \cdot 10^4$

Степень эффективности применения высокопрочных материалов существенно зависит от того, как нагружена сварная конструкция. Наибольшее снижение веса конструкции с повышением прочности металла удастся получить в том случае, когда металл в ней работает на растяжение (рис. 2.4). В конструкциях, воспринимающих сжимающие нагрузки, эффективность применения высокопрочных материалов минимальна, поскольку при проектировании таких конструкций для предотвращения потери устойчивости приходится вводить элементы жесткости и снижать допускаемые напряжения. Сходные проблемы, но в меньшей степени приходится решать при проектировании конструкций, работающих на изгиб. Следует заметить, что применение высокопрочных материалов часто обуславливает необходимость изменения подхода к проектированию конструкции. С увеличением прочности, а следовательно, и напряжений, при которых работает конструкция, возрастают упругие деформации и перемещения (прогибы) конструктивных элементов и на первый план выступают проблемы обеспечения жесткости конструкции. В противном случае она может поте-

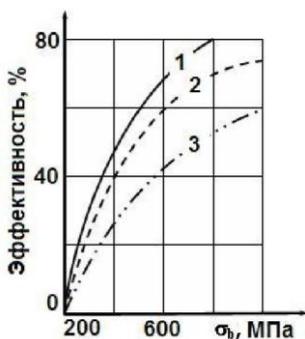


Рис. 2.4. Эффективность использования высокопрочных сталей в конструкциях, работающих на растяжение (1), на изгиб (2) и на сжатие (3)

туть деформироваться. В противном случае она может поте-

⁷ Можно представить как длина стержня из этого материала, который не разрушится под собственным весом, независимо от площади поперечного сечения.



Машины и автоматизация сварочного производства

рять работоспособность вследствие недопустимых изменений ее размеров или формы.

Следует заметить, что применение более прочного конструкционного материала не всегда сопровождается повышением прочности сварной конструкции. Существующие технологии сварки пока не позволяют гарантировать полное отсутствие дефектов, создающих концентрацию напряжений. Для металлических материалов с относительно низкой прочностью они, как правило, не представляют серьезной опасности, поскольку эти материалы обладают большим запасом пластичности. С повышением прочности материала наблюдается снижение запаса пластичности. В результате этого при достижении определенного уровня прочности дефекты сварных соединений могут значительно снизить прочность конструкции. По этой же причине с повышением прочности материала уменьшается работа, требуемая на развитие разрушения, что повышает вероятность катастрофических последствий разрушения сварной конструкции. В связи с этим второй по значимости характеристикой конструкционного материала, используемого в сварной конструкции, является запас пластичности. Большой запас пластичности снижает вероятность преждевременного разрушения сварной конструкции из-за ошибок, допущенных при проектировании или изготовлении, и способствует повышению надежности. Именно по этой причине использование более прочных конструкционных материалов требует высокой культуры проектирования и технологии изготовления сварной конструкции.

Применение высокопрочных материалов для сварных конструкций связано с рядом технологических трудностей и ограничений, обусловленных как технологией получения исходных заготовок, так и технологией сварки. Так, например, рис. 2.5 демонстрирует ограничения на использование высокопрочных сталей для толстостенных конструкций. Прямая линия на рисунке отражает ограничения на изготовление толстостенной конструкции, обусловленные металлургическими особенностями получения исходной заготовки требуемой толщины. Зона 1 соответствует конструкциям, для которых сварку можно производить без подогрева и последующей термической обработки. С повышением прочности ширина этой зоны уменьшается, так как сталь повышенной прочности требует применения подогрева при меньшей толщине. Сварка конструкций, соответствующих зоне 2, вызывает необходимость проведения подогрева и термообработки сварного соединения, что усложняет технологический процесс. Зона 3 относится к сталям мартенситного класса. Для обеспечения прочности сварных соединений конструкций из таких сталей требуется



Машины и автоматизация сварочного производства

применение сложных технологий и, как правило, закалки всей конструкции после сварки с последующим отпуском. Естественно, что границы между зонами на рис. 2.5 проведены условно. Действительное положение границ зависит от особенностей конкретных марок сталей, но общая тенденция, показанная на данной схеме, характерна не только для сталей, но и для алюминиевых и титановых сплавов.

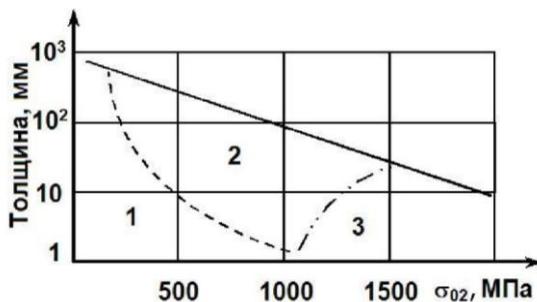


Рис. 2.5. Схема, иллюстрирующая технологические ограничения на использование высокопрочных сталей для толстостенных конструкций:

- 1 – сварка возможна без подогрева и термообработки;
- 2 – требуется подогрев при сварке и последующая термообработка;
- 3 – требуется закалка и отпуск после сварки

В большинстве случаев образование сварного соединения связано с локальным термическим воздействием на металл, что приводит к изменению структуры металла шва и околошовной зоны, а в некоторых случаях и химического состава шва.

Следствием этого могут быть неблагоприятные изменения механических характеристик и появление дефектов. На рис. 2.6 показано типичное для низколегированных сталей изменение механических характеристик в зависимости от скорости охлаждения при сварке.



Рис. 2.6. Влияние скорости охлаждения при сварке на механические свойства сварного соединения

Скорость охлаждения принято характеризовать длительностью пребывания металла в интервале от 800 до 500 °С. При малой длительности этого периода (высокой скорости охлаждения) возможно образование закалочных структур, приводящих к повышению твердости и снижению пластичности (ударной вязкости) материала. При чрезмерно большой длительности пребывания металла в этом интервале температур возможно ухудшение пластических свойств металла шва (снижение ударной вязкости), обусловленное неблагоприятным изменением структуры, в частности, ростом размера зерна. Многие отечественные и зарубежные нормативные документы рекомендуют выбирать режимы сварки так, чтобы твердость не превышала 350HV.

Стали различных марок не одинаково реагируют на термический цикл сварки. Чем меньше эта зависимость, тем выше технологичность конструкционного материала. Важным показателем технологичности материала является его склонность к образованию трещин при сварке. Причины их появления достаточно подробно рассматриваются при изучении других дисциплин, например, «Теории сварочных процессов». Появление трещин обусловлено сочетанием нескольких неблагоприятных технологических и конструктивных факторов. Вместе с тем вероятность появления трещин во многом зависит от химического состава стали, например, содержание таких элементов, как углерод, марганец, хром, молибден, водород, способствует образованию закалочных структур и повышает склонность к образованию холодных трещин. Увеличение содержания серы, фосфора, углерода повышает склонность к образованию горячих трещин.



Машины и автоматизация сварочного производства

По мере увеличения прочности материала требования к ограничению содержания вредных примесей (H_2 ; S; P) в металле становятся все более жесткими. Например, для низколегированных сталей с пределом текучести $\sigma_{02} < 400$ МПа допустимое содержание водорода составляет 6 мл/100г, а для сталей с $\sigma_{02} \geq 1000$ МПа – не более 1 мл/100г.

Аналогичные ограничения существуют при использовании других конструкционных материалов. Так, титановые сплавы при нагреве до температур выше $\sim 400^\circ\text{C}$ сварки активно взаимодействуют с газами, содержащимися в воздухе, и особенно склонны к насыщению водородом, что приводит к резкому снижению пластичности металла. Поэтому при проектировании сварной конструкции необходимо обеспечить возможность защиты этих зон. Медь имеет высокую теплопроводность и жидкотекучесть в расплавленном состоянии. Эти и другие особенности накладывают ограничения на выбор способов сварки и пайки, а также на конструктивное оформление сварного соединения.

В заключение обратим внимание еще раз на те характеристики конструкционного материала, которые необходимо принимать в расчет при обосновании выбора материала для сварной конструкции: **прочность, пластичность, технологичность, стоимость.**

2.2. Металлические материалы для сварных конструкций

Материалы, применяемые для изготовления сварных конструкций, должны обладать следующими свойствами:

- пластичностью, прочностью, позволяющими использовать их в процессе эксплуатации и выдерживать условия испытаний конструкции. При выборе материала необходимо учитывать его склонность к хрупкому разрушению или трещиностойкость. При использовании хрупкого материала должны приниматься меры по исключению хрупкого разрушения, например, путем увеличения коэффициента запаса прочности;

- химической стойкостью к рабочей среде, для которой предназначена конструкция. Изменения химических и физических свойств материалов в течение всего назначенного срока или ресурса эксплуатации конструкции не должны приводить к нарушению его безопасной работы;

- быть пригодными для предусмотренных видов обработки, в



Машины и автоматизация сварочного производства

том числе сварки;

— материалы должны выбираться таким образом, чтобы при соединении разных материалов обеспечивалась прочность конструкции в течение срока ее эксплуатации.

Как правило, конструкционный материал считается пластичным, если при испытании на растяжение его относительное удлинение после разрыва будет не менее 14%, а ударная вязкость, определенная на образцах с концентратором типа KCV (с V-образным надрезом), составляет не менее 27 Дж/см² при температуре не выше 20°C, но не выше, чем минимально допустимая температура.

Несмотря на тенденции, отмеченные на рис. 2.1, в сварочном производстве продолжают преобладать металлические материалы.

Стали и сплавы на железной основе наиболее широко используются при изготовлении сварных конструкций благодаря более низкой их стоимости по сравнению с другими конструкционными материалами, широкому спектру свойств, а также хорошо освоенной в промышленности технологии изготовления. К примеру, более 95 % сварных строительных конструкций изготавливают из стали.

По степени легирования различают: углеродистые стали, низколегированные (с содержанием легирующих элементов до 5%), среднелегированные (с содержанием легирующих элементов 5–10%) и высоколегированные. Химический состав сталей играет первостепенную роль при обосновании их применения для сварных конструкций, так как с повышением содержания легирующих элементов и, особенно, углерода, технология сварки усложняется из-за возрастания вероятности образования трещин.

Влияние легирующих элементов на склонность низколегированных сталей к появлению холодных трещин при сварке принято характеризовать величиной эквивалентного содержания углерода $C_{\text{экв}}$.

Для подсчета величины $C_{\text{экв}}$ существует большое число формул, учитывающих различные детали механизма образования трещин, но наибольшее распространение получили зависимости, рекомендуемые Международным институтом сварки (IIW) и Британским институтом сварки (TWI):

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}; \text{(IIW)} \quad (2.1)$$

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Cr + Mo + V}{10} + \frac{Ni}{15}; \text{(TWI)} \quad (2.2)$$

С повышением $C_{\text{экв}}$ возрастает склонность сталей к образованию закалочных структур, появляется необходимость производить подогрев конструкции перед сваркой и последующую термообработку, т.е. снижается технологичность конструкционного материала. По-



Машины и автоматизация сварочного производства

этому многие нормативные документы рекомендуют ограничивать применение сталей с высоким значением $C_{экв}$. Например, «Руководящий документ по технологии сварки труб при производстве ремонтно-восстановительных работ на газопроводах» РД 558-97 допускает применение труб из сталей с эквивалентным содержанием углерода до $C_{экв} < 0,46\%$, подсчитанным по формуле (2.2).

Склонность низколегированных сталей к появлению горячих трещин характеризует показатель HCS, который в зависимости от химического состава стали определяют по формуле:

$$HCS = \frac{C + S + P + Si / 25 + 0,01Ni}{3Mn + Cr + Mo + V} \cdot 10^3 \quad (2.3)$$

Технологичность сталей с $\sigma_b < 700$ МПа при $HCS \geq 4$ и сталей с $\sigma_b \geq 700$ МПа при $HCS \geq 2$ резко снижается, поскольку для таких сталей весьма вероятно появление горячих трещин при сварке и для их предотвращения требуется введение дополнительных технологических мероприятий.

Химический состав стали во многом определяет технологию сварки (способ, режимы, присадочный материал, технику ведения процесса и др.), поэтому выбор стали для конкретной конструкции достаточно жестко регламентируется отраслевой нормативной документацией, отражающей накопленный в промышленности опыт. Обычно в таких нормативных документах производят деление сталей на группы в зависимости от показателей прочности, назначения, однотипности технологии сварки.

Примером выделения однотипных групп конструкционных материалов является международный стандарт ISO 15608 «Правила группирования конструкционных материалов, применяемых для сварных конструкций».

Аналогичный подход применяется в нормативных документах России, например РД 03-485-02 «Технологический регламент аттестации сварщиков и специалистов сварочного производства». Помимо указания признаков деления на группы, в этом документе приведены конкретные марки сталей, отнесенные к каждой группе. Другие документы, например, ПБ 10-115-96 «Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением» дают рекомендации по применению материалов.

Применение нового конструкционного материала, как правило, требует проведение исследовательской аттестации этого материала или согласования с ведущей в отрасли материаловедческой организацией.

Ряд других нормативных документов определяют конкретную область применения конструкционных сталей с учетом условий



Машины и автоматизация сварочного производства

эксплуатации, таких как область низких или высоких температур, работа в условиях воздействия агрессивных сред, в условиях нейтронного облучения и др.

Химический состав сталей является наиболее важной характеристикой металла для сварных конструкций, но он не всегда и не в полной мере отражает механические свойства изготовленных из них деталей. Прочность и пластичность зависят от вида и толщины проката, способа выплавки стали, вида термической обработки и др.

Поэтому в некоторых отраслях промышленности стали делят на группы в зависимости от прочностных показателей. Например, в строительстве широко используется ГОСТ 27772-88 «Прокат для строительных стальных конструкций», в котором наименование стали (группы сталей) определяется по величине предела текучести металла (например, сталь С390ДТ, где С – сталь строительная, 390 – предел текучести в МПа, Д – гарантированное содержание меди, Т – сталь термически упрочненная).

Поскольку данный стандарт ориентирован на применение стального проката в сварных конструкциях, он предусматривает, что химический состав сталей по основным легирующим элементам должен находиться в некотором гарантированном диапазоне. Он также ограничивает содержание вредных примесей и при необходимости может гарантировать в заданном пределе эквивалентное содержание углерода.

Такое обозначение сталей удобно с точки зрения проведения прочностных расчетов, поскольку в самом наименовании обозначена основная расчетная характеристика конструкционного материала – нормативное сопротивление. В одну группу (под одним наименованием) могут входить стали, отличающиеся по химическому составу (табл. 2.2).



Таблица 2.2

Обозначение сталей по ГОСТ 27772 и соответствующие им марки по действующим стандартам

Наименование стали	Марки по действующим стандартам	
	Марка стали	Обозначение стандарта
C235	Ст3кп2	ГОСТ 380-88, ГОСТ 535-88
C245	Ст3пс5; Ст3сп5	
C255	Ст3Гпс, Ст3Гсп	ГОСТ 380-88
C275	Ст3пс	
C285	Ст3сп, Ст3Гпс, Ст3Гсп	
C345	12Г2С; 09Г2С	
C345Д	12Г2СД; 09Г2СД	
C345К	10ХНДП	
C375	12Г2С	
C375Д	12Г2СД	
C390	14Г2АФ	
C390Д	14Г2АФД	
C390К	15Г2АФДпс	
C440	16Г2АФ	
C440Д	16Г2АФД	
C590	12Г2СМФ	
C590К	12ГН2МФАЮ	

В тех случаях, когда по условиям эксплуатации требуются материалы со сверхвысокой удельной прочностью используют среднелегированные мартенситно-бейнитные стали с содержанием углерода до 0,4% С. Типичным представителем таких материалов являются стали марок 42Х2ГСНМА; 40ХГСНЗМА; 30Х2ГСНВМА, предел прочности которых после закалки низкого отпуска достигает значений $\sigma_b = 1700\text{--}2000$ МПа. Стали данного класса имеют крайне низкий запас пластичности, поэтому для обеспечения высокой конструктивной прочности сварных соединений при проектировании следует избегать резких изменений сечения стенки конструкции. Например, проектирование кольцевых стыков сосудов из таких сталей с остающейся подкладкой недопустимо из-за высокой концентрации напряжений в таком соединении. Кроме того, при сварке наблюдается существенное разупрочнение околошовной зоны, следовательно, при проектировании сварного соединения необходимо предусмотреть



Машины и автоматизация сварочного производства

либо утолщение свариваемых кромок, либо возможность проведения закалки и низкого отпуска готовой конструкции.

Вторым конструкционным материалом по объему применения в сварных конструкциях является алюминий и его сплавы. В экономике Японии, например, ежегодно на душу населения затрачивается 33 кг алюминия.

Алюминиевые сплавы имеют ряд преимуществ по сравнению с другими конструкционными материалами: хорошая коррозионная стойкость, малая плотность и высокая удельная прочность некоторых сплавов, сохранение высоких характеристик пластичности при низких температурах вплоть до криогенных температур. Именно комплекс таких свойств predetermined основные области применения алюминиевых сплавов. Это, в первую очередь, транспортные средства (в Германии до 33%), в том числе аэрокосмический комплекс, где эти преимущества реализуются в наибольшей степени, строительные конструкции (строительство «поглощает» около 15% мировой добычи алюминия), пищевая промышленность.

По отечественным и зарубежным прогнозам, высокопрочные алюминиевые сплавы остаются основным конструкционным материалом для скоростных морских и речных судов, летательных аппаратов, всё большее применение находят они в качестве корпусных материалов при строительстве железнодорожных вагонов и экспрессов, грузовых и легковых автомобилей, в изделиях криогенной техники.

Разработка новых высокопрочных алюминиевых сплавов и технологических процессов сварки способствовали созданию отечественного быстроходного флота. Так, из сплава марки 1561 построены все суда на подводных крыльях: «Стрела», «Колхида», «Комета», «Вихрь», «Тайфун» (морские), «Беларусь», «Спутник», «Буревестник», «Восход» (речные) – всего около 400 судов.

Алюминиевые сплавы делятся на упрочняемые механической обработкой (термически не упрочняемые) и термически упрочняемые. Механические характеристики первых регулируют путем пластической деформации металлического проката в холодном состоянии при его производстве или отдельных зон сварного соединения после сварки. Механические свойства второй группы сплавов регулируют за счет термической обработки, в основном, закалки с последующим старением.

Некоторые примеры алюминиевых сплавов приведены в табл.

2.3.



Таблица 2.3

Примеры алюминиевых сплавов отечественного производства

Система	Марка	Состав	σ_{02} МПа	σ_b МПа	, %
Термически не упрочняемые					
Al	АД1Н	99,3Al	100	150	6
Al-Mn	АМц М	1,3Mn	60	120	40
	АМц Н2		130	170	25
Al-Mg	АМг3 М	3,6Mg; 0,6Si; 0,5Mn	110	220	25
	АМг6 М	6,3Mg; 0,6Mn; 0,05Si	170	340	20
	АМг6 Н		300	400	9
Термически упрочняемые					
Al-Mg-Si	АД33 Т1	1,1Mg; 0,25Cu; 0,6Si	260	310	14
Al-Zn-Mg	1915Т	1,1Mg; 1,0Si; 0,4Mn; 0,18Zn	220	350	17
	1915Т1		300	380	10
Al-Mg-Cu-Zn	В95 Т1	2,3Mg; 1,7Cu; 0,6Zn; 0,4Mn 0,18Cr	440	520	14

Примечание: М – мягкий, отожженный; Н2 – полунагартованный;
 Н – нагартованный; Т – закаленный и естественно состаренный;
 Т1 – закаленный и искусственно состаренный

Способ упрочнения сплава обозначают буквой и цифрой в конце обозначения марки. Следует обратить внимание, что нагартовка (упрочнение путем пластической деформации в холодном состоянии) или термическое упрочнение приводит к гораздо большему повышению предела текучести металла, чем предела его прочности. При этом во всех случаях наблюдается снижение пластичности.

В международной практике алюминиевые сплавы принято обозначать цифровым кодом, состоящим из четырех цифр (хxxx) (рис. 2.7). Первая цифра в коде (Хxxx) обозначает основной легирующий элемент, например серия 1000, 2000 до 8000. Вторая цифра (хХxx), если она отличается от нуля, означает модификацию сплава данной серии, а третья и четвертая (ххXX) – номер сплава данной модификации. Например, сплав 5183: цифра 5 означает, что основной легирующий элемент Mg; 1 – первая модификация базового сплава 5083; 83 – номер в серии сплавов 5xxx. Только для серии 1xxx (чистый алюминий) последние две цифры указывают на минимальное содержание алюминия в сплаве.

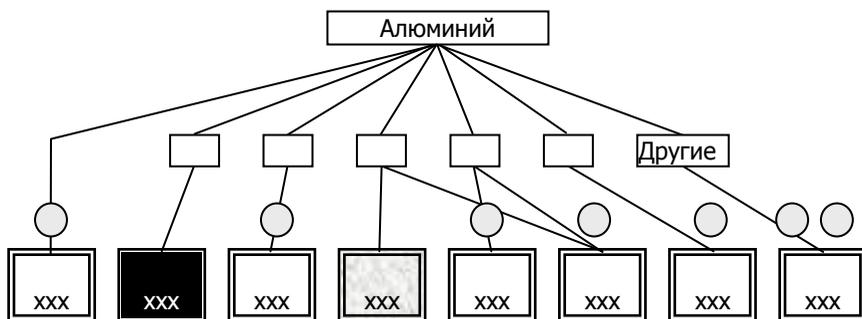


Рис. 2.7. Международная система обозначения марки алюминиевых сплавов

Сплавы серии 1xxx; 3xxx; 5xxx термически не упрочняемые. Их прочность может быть изменена путем пластического деформирования в холодном состоянии. На степень упрочнения указывает буква «Н» и цифра в конце обозначения марки. Сплавы серии 6xxx, 7xxx упрочняют термической обработкой. Вид термической обработки указан буквой «Т» с цифрой в конце обозначения марки. Сплавы серии 2xxx, легированные медью, относятся к группе плохо свариваемым, в сварных конструкция их применять не рекомендуют. Сплавы серии 4xxx часто используют в качестве присадочной проволоки при сварке.

Для соединения деталей из алюминиевых сплавов применяют, в основном, аргодуговую сварку плавящимся или не плавящимся электродом, реже ручную дуговую и сварку по слою флюса, для нахлесточных соединений применяют контактную (точечную, шовную) сварку, иногда применяют склеивание.

Основной проблемой при проектировании сварных конструкций из алюминиевых сплавов является разупрочнение металла в околошовной зоне. Степень разупрочнения зависит от исходного состояния металла, его толщины, формы разделки кромок и режимов сварки. Ширина зоны разупрочнения зависит от режима сварки. Обычно она соизмерима с толщиной металла, но некоторые нормативные документы рекомендуют принимать во внимание, что ее ширина может достигать 25 мм.

Одним из способов обеспечения равнопрочности сварного соединения является утолщение кромок в зоне сварки, однако, реализация этого способа достижима лишь в редких случаях, поскольку



Машины и автоматизация сварочного производства

требуется удалить металл с большой поверхности деталей. По-видимому, этот прием экономически оправдан лишь в тех случаях, когда вес сварной конструкции играет первостепенную роль, например, в конструкциях аэрокосмического комплекса.

В случае применения термически не упрочняемого материала для повышения прочности сварного соединения в околосварной зоне применяют метод пластического деформирования металла в этой зоне путем прокатки между роликами.

Для конструкций из термически упрочняемого материала применяют термическую обработку сварной конструкции после сварки. Например, искусственное старение после сварки позволяет повысить прочность сварного соединения на 10–15 МПа.

При проектировании сварных конструкций снижение прочности в результате сварки учитывают в расчете введением коэффициента работоспособности, который выражается отношением прочности сварного соединения к прочности основного металла до сварки – η_{σ} . Величина этого коэффициента для различных способов сварки и различных сплавов колеблется от 0,5 до 1,0. Поэтому сварные соединения рекомендуется располагать в наименее нагруженных зонах конструкции.

Поскольку высокая прочность алюминиевых сплавов, как правило, достигается за счет упрочняющей обработки, то чем выше прочность основного металла, тем меньше значение η_{σ} . В табл. 2.4 представлены значения расчетных сопротивлений для сварных соединений для основного металла алюминиевых сплавов, используемых в строительных конструкциях.

Таблица 2.4

Расчетное сопротивление алюминиевых сплавов и их сварных соединений (выдержки из СНиП 2-03-06-85)

	Термически не упрочняемые				Термически упрочняемые				
	АД1М	АМцМ	АМг2М	АМг2Н2	АД31Т	АД31Т1	1935Т	1915	1915Т
Металл	25	40	65	65	55	80	115	140	157
Сварные соединения	25	40	70	125	55	120	140	175	195
η_{σ}	1	1	0,93	0,52	1	0,67	0,82	0,8	0,8

Учитывая то, что алюминиевые сплавы чувствительны к концентрации напряжений, значение η_{σ} задают с учетом возможности выполнения контроля качества сварных соединений физически-



Машины и автоматизация сварочного производства

ми методами. Очевидно, что при отсутствии такой возможности величину η_{σ} уменьшают.

При сварке алюминиевых сплавов существует большая вероятность появления пористости в шве, а для сплавов высокой прочности – трещин. В связи с этим сварные конструкции рекомендуется проектировать так, чтобы основную часть сварных соединений можно было выполнить в условиях цеха, где обычно влажность окружающей атмосферы ниже, чем на монтажной площадке. Сварку рекомендуется выполнять при относительной влажности воздуха не выше 70%, а температуру воздуха поддерживать в пределах 16–22 °С.

Для борьбы с трещинами при сварке, помимо технологических приемов, целесообразно при проектировании обеспечить условия для свободного протекания усадки металла шва.

Алюминиевые сплавы имеют на поверхности тугоплавкую окисную пленку, что усложняет процесс сварки и в некоторых случаях требует принятия специальных мер при проектировании соединения для предотвращения попадания окисных включений в шов.

Следующей особенностью алюминиевых сплавов является небольшое значение модуля упругости (приблизительно $0,7 \cdot 10^5$ МПа). Это означает, что при одинаковых нагрузках деформации конструкции, выполненной из алюминиевых сплавов, будут в три раза больше, чем стальных.

Во многих случаях работоспособность конструкции определяется некоторой допустимой величиной деформации и, следовательно, при проектировании приходится решать проблемы повышения жесткости этой конструкции. Кроме того, малый модуль упругости материала способствует появлению больших по величине деформаций сварных конструкций.

Учитывая особенности алюминиевых сплавов как конструкционного материала для сварных конструкций, сформулируем общие рекомендации, которые целесообразно принимать во внимание при проектировании:

- необходимо, по возможности, располагать сварные соединения в наименее нагруженном участке конструкции;
- располагать швы в доступном для сварки месте, поскольку сварочная горелка для сварки алюминия больше по размерам, чем для сварки сталей;
- проектировать сварные узлы более простой формы;
- проектировать сварные соединения так, чтобы они были доступны для визуального и измерительного контроля и контроля неразрушающими методами;
- если нет возможности вынести швы из высоконагруженной



Машины и автоматизация сварочного производства

зоны конструкции, необходимо предусмотреть утолщение стенки в районе сварного соединения или принять меры для уменьшения зоны термического влияния;

- для сварных соединений, работающих при переменных нагрузках, необходимо принять меры для снижения концентрации напряжений в районе шва;

- необходимо избегать несимметричного расположения сварных швов, способствующих увеличению сварочных деформаций;

- необходимо избегать применения коротких или прерывистых швов, так как такие швы сварщику трудно выполнить с высоким качеством. Кроме того, прерывистые швы создают большую концентрацию напряжений и снижают усталостную прочность.

Весьма перспективными материалами для производства сварных конструкций являются титановые сплавы.

Как химический элемент титан был открыт в 1791 г., но лишь в 1887 г. был получен металл с содержанием 95% титана, а в 1910 г. – с частотой 99%. Широкое промышленное освоение титана и его сплавов начинается приблизительно с 1950 г., после промышленного освоения достаточно сложной и энергоемкой технологии его получения.

Преимущество титановых сплавов перед другими конструкционными материалами заключается в том, что их высокая удельная прочность при комнатной и высокой температурах сочетается с коррозионной стойкостью на воздухе, в морской воде и во многих химически активных средах. Титан и его сплавы имеют довольно высокий предел прочности в сочетании с относительно низкой плотностью – $4,5 \text{ г/см}^3$. По характеристике «удельная прочность» титановые сплавы превосходят другие конструкционные металлические материалы (табл. 2.5).

Таблица 2.5

Удельная прочность конструкционных металлических материалов

Свойства	Сплавы			
	Алюминиевые		Титановые	Сталь
	2024-Т3	7075-Т6	Ti-6Al-4V	4130
$\sigma_{в}$, МПа	440	537	924	1380
ρ , г/см ³	2,8	2,8	4,43	7,8
$\sigma_{в}/\rho$, м · 10 ³	16,1	19,6	21,3	17,9



У титана отсутствует склонность к коррозионному растрескиванию в некоторых водных средах, вызывающих растрескивание других металлов, например, нержавеющей стали; по коррозионной стойкости титан превосходит подавляющее большинство металлов и сплавов. Титановые сплавы обладают высокой устойчивостью к воздействию циклических нагрузок при работе в коррозионной среде.

Титановые сплавы обладают высокой прочностью и коррозионной стойкостью при повышенных температурах (до 500°C). Однако с дальнейшим повышением температуры прочность титановых сплавов резко снижается, и при температурах выше 500–550°C их удельная прочность становится ниже, чем у других конструкционных материалов, например легированных сталей.

У титана ярко выражен предел выносливости, т.е. при определенном уровне циклических напряжений дальнейшее увеличение числа циклов не приводит к заметному снижению циклической прочности. Предел выносливости гладких образцов составляет в среднем 48–55% от предела прочности титановых сплавов, что значительно больше, чем у алюминиевых.

Главным потребителем титановых сплавов в настоящее время является промышленность, производящая летательные аппараты, где вопрос снижения веса конструкции имеет первостепенное значение. Эти сплавы применяются для основных деталей (лопаток, дисков, колец) компрессора реактивных двигателей, для изготовления деталей планера самолетов, шасси, фюзеляжа, деталей управления, оперения и др.

В конце 1968 г. поднялся в воздух первый в мире сверхзвуковой пассажирский лайнер Ту-144. Рули поворота, элероны и некоторые другие его детали, нагревающиеся во время полета до высокой температуры, выполнены из титана. Более 90% конструкции планера SR-71 "Блэкберд" фирмы "Локхид" изготовлено из титановых сплавов, так как аэродинамический нагрев при полете с большими скоростями (более 3530 км/ч) приводит к повышению температуры обшивки до ~ 650°C. При этом температура за бортом может достигать -60°C, т.е. рабочий диапазон составляет более 700°C.

По этой же причине из титановых сплавов изготавливают многие детали и узлы космических аппаратов многообразного действия (рис. 2.8).



Машины и автоматизация сварочного производства

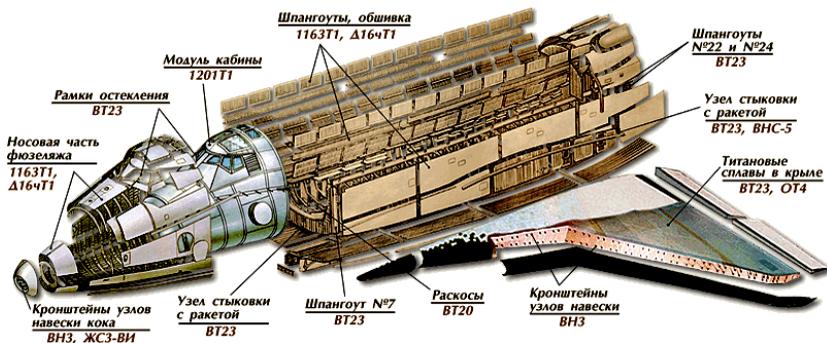


Рис. 2.8. Космический аппарат многоразового действия «Буран»

Титановые сплавы также широко применяются в судостроении. В первую очередь из титановых сплавов изготавливаются детали, соприкасающиеся с морской водой: обшивка, ходовые винты и узлы их крепления, детали морских насосов и гидронасосов, теплообменников и др.

В 1983 г. на вооружение ВМФ СССР поступила атомная подводная лодка "К-278", впоследствии названная "Комсомолец". Ее сварной сверхпрочный титановый корпус позволял погружение на глубину, которой не достигала ни одна лодка в мире – 1000 м.

В более поздние годы была создана целая серия подводных лодок, имеющих прочный корпус из титановых сплавов. Применение для изготовления прочного корпуса титанового сплава с пределом текучести 700–720 МПа обеспечило увеличение предельной глубины погружения в 1,5 раза. Использование титанового сплава высокой удельной прочности позволяло за счет уменьшения массы корпуса экономить на водоизмещении лодки до 25–30 %.

Важным достоинством титановых сплавов является то, что большинство из них сохраняют пластические свойства при весьма низких температурах, вплоть до температур жидкого азота и водорода. Это открывает широкие возможности для их использования в криогенной технике.

Основным недостатком титановых сплавов является высокая стоимость их производства. Несмотря на это, замена их более дешевыми материалами во многих случаях оказывается экономически невыгодной. Например, корпус химического аппарата, изготовленный из нержавеющей стали, стоит 150 условных единиц, а из титанового сплава – 600. При этом стальной реактор служит лишь 6 месяцев, а титановый – 10 лет. Сварка титановых сплавов хорошо освоена промышленностью, но имеет ряд технологических особенностей и требу-



Машины и автоматизация сварочного производства

ет высокой технологической культуры сварочного производства.

Титановые сплавы при относительно невысоких температурах активно взаимодействуют с водородом и кислородом, поэтому при проектировании сварных соединений необходимо предусматривать возможность размещения при сварке различных устройств для дополнительной защиты участков сварного соединения, подвергающегося нагреву выше 400–450 °С.

В зависимости от структуры титановые сплавы можно разделить на три группы:

1) сплавы с альфа-структурой. К ним относятся ВТ1 (технический титан), ВТ5, ВТ5-1, ВТ10. Эта группа сплавов отличается хорошей свариваемостью и термической стабильностью, т.е. отсутствием охрупчивания при совместном длительном воздействии высоких температур и напряжений;

2) сплавы с альфа-, бета-структурой (это сплавы ОТ4, ОТ4-1, ВТ4, ВТ9, ВТ8, ВТ6). Благодаря более пластичной бета фазе эти сплавы более технологичны и лучше обрабатываются давлением, чем альфа сплавы;

3) сплавы с бета-структурой (например, сплавы ВТ14, ВТ15 с высоким содержанием хрома и молибдена). Эти сплавы сочетают хорошую технологическую пластичность с очень высокой прочностью и хорошей свариваемостью.

Из α -сплавов наиболее широко применяют в различных странах мира сплав типа Ti-5Al-2,5Sn (ВТ5-1). Модификация этого сплава с пониженным содержанием примесей практически не склонна к хладноломкости до температур жидкого водорода.

Наиболее распространенным из группы α -, β -сплавов является сплав Ti-6Al-4V (ВТ6). Его используют для изготовления крупногабаритных сварных конструкций, работающих в широком интервале температур: от -196 °С до $+450$ °С. По зарубежным данным, около 50% всех титановых конструкций авиационно-космической промышленности приходится именно на этот сплав.

Сварка β -сплавов в большинстве случаев затруднена в связи с сильным ростом зерна в околосшовной зоне и ликвацией легирующих элементов в сварном шве. К числу удовлетворительно свариваемых можно отнести сплав ВТ22 (Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe).

Примеры механических характеристик некоторых титановых сплавов приведены в табл. 2.6.



Таблица 2.6

Механические свойства титановых сплавов

Марка	Состав	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %
BT1-0	Нелегированный	390–540	≥ 20	≥ 50
BT5-1	5Al-2,5Sn	750–900	6–26	12–45
BT6	Ti-6Al-4,5V	880–1230	6–20	12–50
BT22	Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe	960–1860	3,5–18	12–65

2.3. Неметаллические материалы для сварных конструкций

Очевидно, что смещение интересов промышленности в сторону неметаллических материалов объясняется потребностью иметь конструкционные материалы с такими свойствами, которые прежний набор материалов не мог обеспечить. Прежде всего, это материалы со специальными свойствами, позволяющие создавать конструкции для работы в экстремальных условиях: при сверхвысоких или сверхнизких температурах, в химически активных средах, а также материалы, обладающие высокой удельной прочностью.

Несмотря на то, что в области сварочного производства продолжают «господствовать» металлические материалы, анализ свойств неметаллических конструкционных материалов представляет большой интерес, поскольку, как можно видеть на рис. 2.1, за ними будущее. Неметаллические материалы по праву можно отнести к материалам XXI века, и они стремительно вытесняют металлические материалы из традиционных областей применения сварных металлических конструкций.

Керамика представляет собой семейство чрезвычайно разнообразных материалов, от известной с давних времен керамики гончарных изделий и огнеупорной керамики до современных промышленных керамик (таких как нитрид алюминия, нитрид кремния), нашедших применение в электронике, аэрокосмической промышленности, в производстве режущего инструмента. После того как в 1980 г. была высказана идея создания полностью керамического двигателя внутреннего сгорания, о керамике стали говорить как об основном машиностроительном материале.

Для керамических материалов характерна ионная и/или ковалентная связь, благодаря чему они имеют, как правило, низкую тепло- и электропроводность; высокую химическую стойкость к воз-



Машины и автоматизация сварочного производства

действию сильных кислот, щелочей и расплавленного металла; высокую твердость; низкий коэффициент трения и высокую износостойкость; низкий коэффициент температурного расширения и низкую, по сравнению с другими конструкционными материалами, плотность; высокую прочность при сжатии. Коэффициент сухого трения керамических материалов в 3–5 раз меньше, чем у стали. Сопротивление истиранию и абразивному износу, например карбида кремния, в 10–14 раз выше, чем стали. Такие характеристики обеспечивают значительные преимущества этих материалов при использовании их в парах трения.

Керамики сохраняют свои свойства при экстремально высоких и низких температурах, кроме того, они выдерживают резкую смену температуры эксплуатации (термоудар). К сожалению, высокую прочность керамических материалов трудно реализовать в конструкциях, работающих при растяжении, из-за крайне низкой пластичности этих материалов.

Некоторые керамические материалы могут обладать высокотемпературной сверхпроводимостью (например, оксидные керамики на основе Y-Ba-Cu-O) или высокой тепло- и электропроводностью (такие, как алмаз или карбид кремния). Путем регулирования микроструктуры можно создать керамические материалы, пригодные для изготовления пружин.

Свойства наиболее распространенных в инженерной практике керамических материалов приведены в табл. 2.7.

Основная область применения керамических материалов – конструкции, которые работают в химически активных средах или при высоких температурах, а также от которых требуются высокие трибологические свойства (свойства, характеризующие трение и износ трущихся пар конструкционного материала).

Инженерные керамики используют в различных отраслях промышленности. В электронной промышленности и приборостроении их используют в качестве подложки микросхем, изоляторов, вакуумных вводов (рис. 2.9,а) пьезопреобразователей, в приборах ночного видения. Известны примеры изготовления из керамики роторов высокотемпературных газовых турбокомпрессоров (рис. 2.9,б), лопаток турбин, элементов термоизоляции. Благодаря таким свойствам, как низкий коэффициент трения и высокая износостойкость, они применяются для кулачков распределительного вала двигателя, подшипников, работающих без смазки, клапанов (рис. 2.9,в). Широкое применение они находят в промышленности при изготовлении инструмента для обработки резанием, а также абразивного инструмента.



Таблица 2.7

Свойства керамических материалов

Керамика	Температура плавления, °С	Плотность, г/см ³	Прочность, МПа	Коэффициент температурного расширения, $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	Модуль упругости, ГПа
BeO	2530	3.1	246	7.4	400
Al ₂ O ₃	2050	4.0	455	8.0	380
ZrO ₂	2700	5.6	175	10.5	140
AlN	1900	3.3	441	4.4	320
Si ₃ N ₄	1900	3.2	210	3.0	175
B ₄ C	2350	2.5	350	4.3	450
SiC	2700	3.2	140	4.3	210
WC	2377	15.8	600	5.2	700
Алмаз	3000	3.5	1500	0.5	500

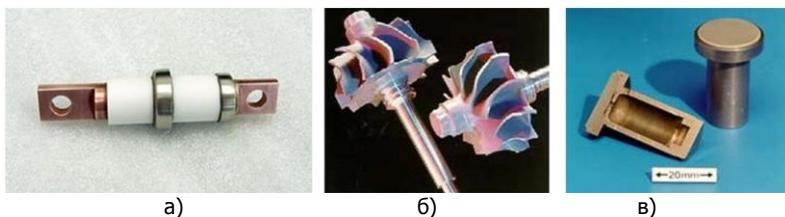


Рис. 2.9. Изделия из керамики:
 а – высокоамперный вывод (паяное соединение металл – керамика);
 б – ротор турбокомпрессора (керамика Si₃N₄);
 в – клапан, облицованный керамикой (паяное соединение)

При выборе керамического материала для конкретного назначения необходимо учитывать условия эксплуатации конструкции: атмосфера, в которой работает конструкция; температура эксплуатации, длительность воздействия высоких температур и скорость нагрева-охлаждения; уровень напряжений, скорость нагружения, количество циклов нагружения (возможность протекания процессов усталости).

При проектировании конструкций следует иметь в виду, что керамические материалы крайне чувствительны к концентрации напряжений. Резкое изменение поперечного сечения детали, т.е. наличие отверстий, выступов, надрезов, может существенно повлиять на прочность конструкции.

Существует широкий спектр способов соединения керамических материалов: механическое соединение, склеивание, пайка, сварка. Из способов сварки пока находят применение диффузионная и электроннолучевая. Выбор того или иного способа соединения зависит от условий эксплуатации: температуры, требований герметич-



Машины и автоматизация сварочного производства

ности, прочности, конструктивных особенностей изделия. Возможности обеспечения заданной температуры эксплуатации при использовании различных способов соединения керамических материалов иллюстрирует рис. 2.10.

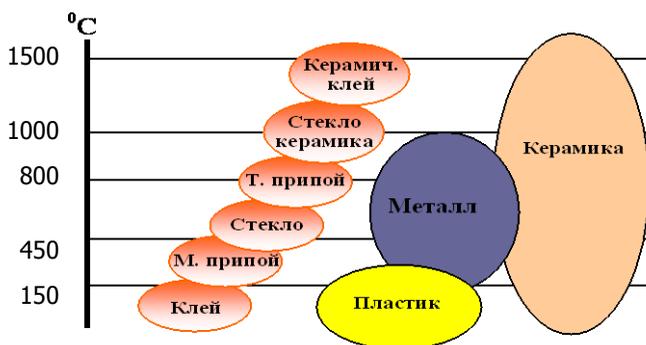


Рис. 2.10. Рекомендуемые способы соединения материалов в зависимости от требуемой температуры эксплуатации

Нередко в элементах конструкций керамические материалы используются в сочетании с другими материалами (чаще металлами), что создает предпосылки для расширения функциональных возможностей конструкций. Это предопределяет важность разработки методов проектирования соединений керамики с другими конструкционными материалами.

При проектировании соединения керамики с металлом возникают серьезные проблемы, обусловленные тем, что у этих материалов существенно отличаются коэффициенты температурного расширения, что вызывает появление больших собственных напряжений в соединении. Для борьбы с этим явлением при проектировании соединения необходимо целенаправленно изменять податливость соединяемых деталей; использовать промежуточные прослойки, которые должны сглаживать различия в коэффициентах температурного расширения. Процесс образования соединения затруднен различиями в типе электронной связи (ионная/ковалентная для керамики и металлическая), несоответствии кристаллических решеток керамики и металла. В настоящее время наилучшим образом удается добиться соединения методами пайки. Для обеспечения прочности керамической конструкции необходимо применять специальные конструктивные решения для узлов соединения.

Второй группой конструкционных материалов, которым удается успешно конкурировать с металлами и сплавами в области



Машины и автоматизация сварочного производства

производства сварных конструкций, являются полимеры.

Изобретение и промышленное освоение полимеров, в том числе высокотемпературных, по-видимому, относится к самым крупным событиям мирового значения в области развития конструкционных материалов. Наибольшее распространение в странах Западной Европы и США получила технология изготовления из полиэтилена и полипропилена водогазопроводных труб высокого давления и фитингов к ним. Полимерные материалы широко используются для изготовления сосудов химического и нефтехимического производства (рис. 2.11). Например, по данным за 1994 г., в Швейцарии доля полимерных труб составила 69,3 %, в Финляндии – 50,8; в Германии – 46,2; в Норвегии – 41,7 %. К 2000 г. произошло увеличение доли полимерных труб в Польше – в 5 раз, в Великобритании – в 2 раза. Во Франции объем полимерных трубопроводов возрастает опережающими темпами, в то время как протяженность трубопроводов из традиционных материалов (сталь, чугун) с 1984 г. непрерывно сокращается (рис. 2.12).



Рис. 2.11. Сварной сосуд из полиэтилена

Экономический эффект от использования труб из полипропилена взамен стальных складывается из экономии затрат на транспортировку (1:9), сокращения трудоемкости и отходов при монтаже



Машины и автоматизация сварочного производства

(1:10), экономии расходных материалов, отсутствия расходов в период эксплуатации, а также значительного срока службы (более 50 лет). Приведенная стоимость трубопроводов из полипропилена на 30–40 % ниже стоимости трубопроводов, выполненных из стальных оцинкованных или чугунных труб.

Опыт США, Канады, Германии и других стран показал рентабельность применения полимерных материалов: 1 т пластмассовых труб заменяет 7,5 т стальных и 12 т чугунных труб.

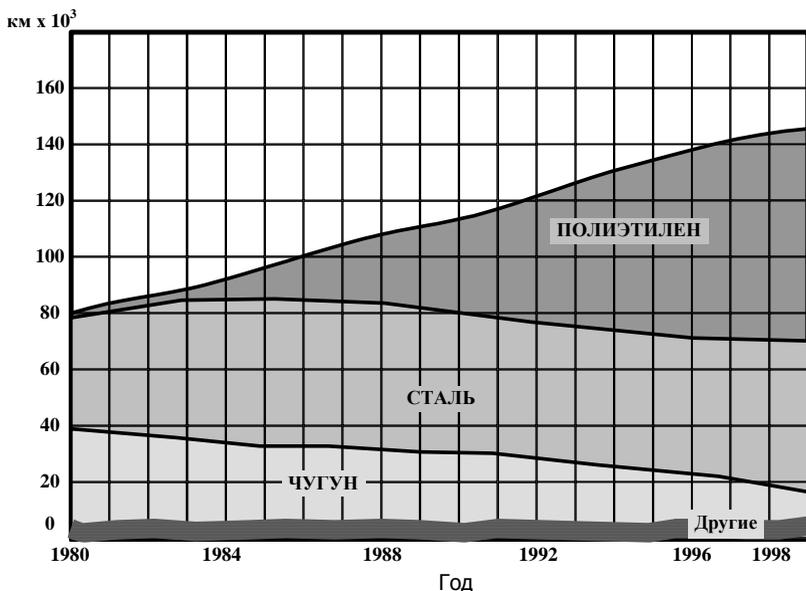


Рис. 2.12. Материалы, применяемые во Франции для трубопроводов

К значительным преимуществам полимерных материалов можно отнести их высокую химическую устойчивость, а также способность к значительным деформациям без нарушения целостности материала (например, обратимые деформации полиэтилена достигают 7%). Благодаря этому свойству полимерные трубы выдерживают неоднократные замерзания воды в них, гасят гидравлический удар.

Полимерные материалы имеют значительно меньшую плотность по сравнению с другими конструкционными материалами. Например, полиэтиленовые трубы в 2,5–3,5 раз легче стальных, рассчитанных на то же давление. Это существенно упрощает монтаж конструкций, поскольку не требует грузоподъемных механизмов и сокра-



Машины и автоматизация сварочного производства

щает транспортные расходы.

Благодаря малой плотности и высокой эластичности полимеров появляется возможность вести монтаж из длинномерных заготовок, что также способствует сокращению затрат средств и времени на монтаж. К примеру, полиэтиленовые трубы можно транспортировать к месту монтажа свернутыми в бухты, длиной до 450 м. Чтобы сварить 800 метров трубопровода диаметром 110 мм, требуется всего 1 стык вместо 60-80 стыков для стальных труб.

К недостаткам полимерных материалов относится следующее:

- Срок службы их находится в обратной зависимости от нагрузки и температуры, при которой эксплуатируются конструкции, причем даже в пределах допустимого диапазона более высокие нагрузки снижают безопасный срок службы.

- Изменение механических характеристик некоторых полимеров под действием ультрафиолетового излучения, это делает невозможным эксплуатацию конструкций в не защищенных от солнечного света условиях. Для предотвращения этого в полимеры добавляют специальные компоненты – светостабилизаторы (обычно используется обыкновенная техническая сажа).

- Относительно узкий диапазон температур эксплуатации. При низких температурах наступает стеклование (переход в хрупкое состояние), а при высоких – ослабление сил межмолекулярного взаимодействия, что делает полимер пластичным, а в предельных значениях и текучим. Кроме того, все полимеры обладают достаточно высоким коэффициентом линейного расширения, изменения температурного режима эксплуатации приводит к значительным изменениям линейных размеров деталей и конструкции в целом, что требует применения при проектировании специальных мер для предотвращения изменения размеров и формы конструкции.

Компоненты трубопровода из полимерных материалов не наносят вред окружающей среде. Например, ни при обработке, ни при утилизации отходов не образуются экологически вредные вещества. Кроме того, утилизация отходов полипропилена производится без добавления экологически вредных веществ.

В сварных строительных конструкциях наиболее широкое применение нашли полиэтилен (марки ПЭ80, ПЭ100 – цифра характеризует предел длительной прочности материала в МПа $\times 10$) и полипропилен ПП как материал для трубопроводов.

Полиэтиленовые трубы используют для подземных систем газоснабжения (диаметром до 250 мм) и водоснабжения (диаметром до 1200 мм). Полиэтилен относится к числу наиболее хорошо сваривае-



Машины и автоматизация сварочного производства

мых полимеров. Сравнивая полиэтилен с другими полимерными материалами, следует отметить его низкую сопротивляемость высоким температурам.

Полипропилен обладает более высокой прочностью, жесткостью, температурной устойчивостью. Он более стоек против усталостного растрескивания, хорошо сваривается. В то же время полипропилен является более хрупким материалом особенно при отрицательных температурах, в большей степени подвержен термоокислительной деструкции.

Для соединения полимерных материалов используют разнообразные методы: склеивание, ультразвуковую сварку, сварку трением, лазерным лучом, горячим воздухом, нагретым инструментом или специальным нагревательным элементом, встроенным в одну из свариваемых деталей.

Сварка полимерных материалов значительно дешевле, проще и занимает меньше времени, чем сварка металлических материалов, но, к сожалению, не все способы сварки позволяют получить соединения, равнопрочные основному материалу. Для получения достаточно высокой прочности клееных соединений требуется специальная конструкция таких соединений.

При использовании сварки плавлением на свариваемость наиболее распространенных конструкционных материалов – термопластов – влияют следующие основные факторы: энергия активации вязкого течения; ширина температурного интервала вязкотекучего состояния материала (от температуры перехода в вязкое состояние T_t до температуры деструкции T_r) и вязкость расплава.

К группе хорошо свариваемых относятся термопласты, у которых:

- энергия активации вязкого течения меньше 150 кДж/моль;
- температурный интервал вязкотекучести $T_r - T_t > 50$ °С;
- вязкость расплава составляет 102–105 Па · с.

Выбор способа соединения зависит в первую очередь от свойств полимера, конфигурации свариваемых деталей, типа соединения (стыковое, угловое, нахлесточное), а также от требуемого уровня прочности соединения.

Благодаря высокой удельной прочности, а также высокой технологичности и коррозионной стойкости, в последние годы в автомобильной промышленности, судостроении, строительстве находят все более широкое применение композитные материалы (металлопластики, углепластики, стеклопластики). В 1964 г. в Советском Союзе впервые в мире из стеклопластиков была осуществлен серийный выпуск тральщиков водоизмещением более 300 т.



Машины и автоматизация сварочного производства

В Дании построен из стеклопластика мост (рис. 2.13). В России в ЦНИИ КМ «Прометей» разработана и промышленно освоена технология изготовления стеклопластиковых прочных корпусов обитаемых и обитаемых аппаратов для работы на океанских глубинах более 2000 м (рис. 2.14).



Рис. 2.13. Мост из армированного стеклопластика (Дания)



Рис. 2.14. Глубоководный аппарат из армированного стекловолокна

В качестве армирующего элемента в композиционных материалах часто используются керамические материалы. Некоторые керамические композиционные материалы по характеристикам вязкости разрушения превосходят чугун и могут достигать 50% аналогичных показателей для высокопрочных сталей.

Металлопластиковые трубы позволяют транспортировать газы и жидкости при значительно более высоком давлении и температуре. К сожалению, сварка композиционных материалов представляет определенные трудности и требует разработки специальной конструкции сварного соединения.

Основой надежности и долговечности многослойных композитных труб является клей, соединяющий металлический каркас с полимерным материалом и призванный погасить возникающие напряжения между разнородными материалами.

Благодаря существенным преимуществам по удельной прочности и жесткости, исключительному сочетанию конструкционных, теплофизических, специальных свойств, полимерные композитные материалы (ПКМ) в большом объеме применяются в конструкциях летательных аппаратов. Если в конструкции планера и в интерьере самолета Ту-204 объем применения ПКМ составил 14% от массы, то в перспективных пассажирских аэробусах (типа АЗХХ) он достигнет 25%.



Машины и автоматизация сварочного производства

Применение ПКМ на основе углеволокна – одно из эффективных средств снижения массы конструкции. Совершенствование прочностных, деформационных, теплофизических характеристик углепластиков и повышение их теплостойкости даст возможность использовать их не только в слабо- и средненагруженных конструкциях пассажирских самолетов (интерьер, средства механизации крыльев, зализы и т.п.), но и в перспективе по аналогии с военными самолетами, в высоконагруженных деталях типа крыльев, вертикальных рулей и др.

Объем применения в конструкциях вертолетов ПКМ (угле-, стекло- и органопластики) и гибридных материалов существенно выше, чем в конструкциях самолетов, и достигает в изделиях последних модификаций до 60% от массы. Их применение в конструкциях несущих винтов, лонжеронов, обшивки и хвостовых секций, обшивок сотовых панелей руля, киля, стабилизатора, топливных баков, антенных обтекателей обеспечивает снижение веса на 30%, увеличение ресурса в 2-4 раза, существенное повышение боевой живучести.

Особенно эффективно применение ПКМ для изготовления лопастей вентиляторов для двигателей самолетов Ан-70, Ил-114, Ан-140, Ан-38.

Благодаря снижению массы лопастей (по сравнению с алюминиевым сплавом на 66%) обеспечиваются высокая тяга на старте, сокращение разбега при взлете и посадке, снижение в 2–3 раза шума и вибрации, расхода топлива на 25% и повышение КПД до 0,85–0,88.

2.4. Виды исходных заготовок для сварных конструкций

Конструкционный материал поступает в сварочное производство в виде литых или кованных заготовок, как правило, прошедших предварительную механическую обработку, а также в виде проката.

Литые и кованные заготовки. При рациональном конструировании сварного узла применение литых и кованных заготовок сокращает объем сварочных работ позволяет вынести сварные швы из наиболее нагруженных участков конструкции, уменьшить концентрацию напряжений. Преимуществом такого вида заготовок является возможность индивидуального подхода к выбору материала и геометрической формы заготовок. Вместе с тем литые и кованные заготовки имеют, как правило, большую толщину стенки, большую массу и стоят дороже по сравнению с заготовками из листового и профильного проката. Следует обращать внимание на то, что стальные литые



Машины и автоматизация сварочного производства

заготовки могут иметь пористость и повышенное содержание серы. Их сварка требует применения дополнительных технологических приемов для предотвращения появления трещин.

Применение литых и кованных заготовок наиболее эффективно при проектировании крупногабаритных, толстостенных сварных конструкций, таких как станины металлообрабатывающего оборудования, а также при изготовлении деталей машин, корпусов двигателей, энергетического оборудования, например, валов газовых турбин, колес газо- и гидротурбин, имеющих лопатки сложного профиля. Применение литых и кованных заготовок бывает оправданным в крупносерийном производстве.

В сварочном производстве наиболее широко применяют заготовки из широкополосного универсального проката, фасонного, сортового проката и гнутых профилей. Благодаря массовому производству заготовок из проката оказываются дешевле. Заданные размеры и форму заготовок из проката получают путем применения различных способов резки (раскроя) металла, штамповки и гибки.

Листовой прокат используют для изготовления сварных труб и конструкций, гнутых профилей, корпусов судов, химической и теплообменной аппаратуры, кузовов автомобилей, летательных аппаратов и вагонов и многих других изделий. Металлический лист обеспечивает оптимальные решения конструкционных задач при минимизации затрат металла.

Листовую сталь подразделяют:

- по способу производства: на горячекатаную и холоднокатаную;

- по толщине: на тонколистовую (толщиной от 0,5 до 3,9 мм, в некоторых стандартах от 0,35 до 5,0 мм) и толстолистовую (толщиной от 4 до 160 мм);

- по видам поставки: в виде листа (толщиной от 4 до 160 мм) и в рулонах (толщиной от 4 до 12 мм). Внутренний диаметр стали, поставляемой в рулонах, должен быть не менее 650 мм и не более 1000 мм, а масса рулона листовой стали не более 20 т.

По точности изготовления ГОСТ 19903-74. Прокат листовой горячекатаный⁸ предусматривает следующую градацию:

⁸ Существует несколько стандартов, регламентирующих технические условия на прокат, в которых даны иные обозначения точности проката, например, ГОСТ 5520-79. Сталь листовая углеродистая низколегированная и легированная для котлов и сосудов, работающих под давлением. Технические условия. ГОСТ 19281-89. Прокат стальной повышенной прочности. Технические условия. ГОСТ 14918-80. Сталь тонколистовая оцинкованная с непрерывных линий. Технические условия. ГОСТ 19904-90. Прокат листовой холоднокатаный. Сортамент. ГОСТ 16523-97. Прокат тонколистовой из углеродистой стали качественной и обыкновенного качества общего назначения. Технические условия.



Машины и автоматизация сварочного производства

– по точности прокатки: А – повышенной точности; Б – нормальной точности.

– по плоскостности: ПО – особо высокой плоскостности; ПВ – высокой плоскостности; ПУ – улучшенной плоскостности; ПН – нормальной плоскостности.

– по характеру обработки кромки: НО – с необрезной кромкой; О – с обрезной кромкой.

– по размерам.

Серповидность стали, поставляемой в рулонах, не должна превышать 10 мм на длине 2 м.

Сталь, поставляемая в листах с обрезной кромкой, должна быть обрезана под прямым углом. Косина реза и серповидность не должны выводить лист за номинальный размер.

При поставке стали в листах и в рулонах с не обрезной кромкой надрывы и другие пороки (если они имеются на кромках) не должны превышать половины предельных отклонений по ширине и выводить листы за номинальный размер по ширине, указанный в заказе.

Пример условного обозначения.

Лист повышенной точности (А), особо высокой плоскостности (ПО) с обрезной кромкой (О), с размерами 8 x 1500 x 6000 мм по ГОСТ 19903 из стали марки СтЗсп, категории 3, с гарантией свариваемости по ГОСТ-14637:

Лист $\frac{А - ПО - О 8 \times 1500 \times 6000 \text{ ГОСТ } 19903-74}{СтЗсп3 - св \text{ ГОСТ } 14637-89}$.

При проектировании конструкций применительно к индивидуальному и мелкосерийному производству применяют листовой прокат, выпускаемый в листах. При этом предпочтение отдают листам возможно большего размера, предусмотренного действующим сортаментом. Это позволяет более экономно произвести раскрой заготовок, а при проектировании крупногабаритных сосудов, резервуаров, балок и других листовых конструкций, сократить количество сварных швов и их суммарную протяженность.

При проектировании конструкций применительно к массовому производству листовых конструкций, таких как спирально-шовные трубы, сварные балки при высокочастотной сварке, когда требуется непрерывность подачи заготовок или подача их с большой скоростью, рекомендуется использовать листовой прокат, выпускаемый в рулонах.

Широкополосный универсальный прокат. В отличие от листового проката при изготовлении широкополосного универсального проката заготовку обжимают как по толщине, так и по ширине.



Машины и автоматизация сварочного производства

Такой прокат, как правило, не требует обработки по боковым кромкам, что снижает трудоемкость изготовления сварной конструкции.

В соответствии с ГОСТ 82-70 «Прокат стальной горячекатаный широкополосный универсальный. Сортамент» широкополосный прокат выпускают шириной от 200 до 1050 мм и толщиной от 6 до 60 мм. Длина полосы может быть от 5 до 12 м, а по требованию потребителя – от 2 до 18 м: немерной длины, мерной длины или кратной мерной длины.

Широкополосный прокат используют при проектировании сварных балок, колонн таврового и Н-образного сечения в качестве полок.

Сортовой прокат. К сортовому прокату относятся прокат с простым профилем сечения: круг, квадрат, шестигранник и др. и фасонным (рис. 2.15) профилем: швеллер, уголок (равнобокий и неравнобокий), прокат таврового и двутаврового сечения.

Фасонный сортовой прокат является основным видом исходных заготовок при проектировании рамных конструкций и строительных конструкций: сварных ферм, ограждений, каркасов зданий, этажерок и др.

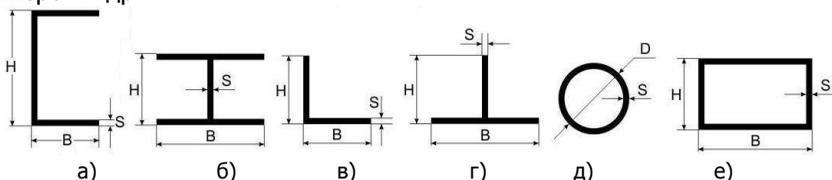


Рис. 2.15. Виды фасонного проката:

а – швеллер; б – двутавр; в – уголок; г – тавр;
д – труба круглого сечения; е – труба прямоугольного сечения

Стальные горячекатаные швеллеры общего и специального назначения высотой от 50 до 400 мм и шириной полок от 32 до 115 мм изготавливаются по ГОСТ 8240-97. Швеллеры стальные горячекатаные. Сортамент.

По форме и размерам швеллеры изготавливают:

По форме и размерам швеллеры изготавливают следующих серий: У – с уклоном внутренних граней полок; П – с параллельными гранями полок; Э – экономичные с параллельными гранями полок; Л – легкой серии с параллельными гранями полок; С – специальные (предназначены для применения в автомобильной промышленности и в вагоностроении).

Швеллеры изготавливают длиной от 4 до 12 м: мерной длины; кратной мерной длины; немерной длины.



Машины и автоматизация сварочного производства

Геометрические характеристики сечения швеллеров определяют по номерам, которые соответствуют высоте сечения швеллера (в см). Сортамент (ГОСТ 8240-93) включает швеллеры от №5 до №40 с уклоном внутренних граней полок. Уклон внутренних граней полок затрудняет конструирование. В ГОСТ входят и швеллеры с параллельными гранями полок с буквой П в обозначении, например 22П, сечения которых имеют лучшие расчетные характеристики и более конструктивны, так как упрощают болтовые крепления к полкам.

Швеллеры изготавливают не только путем прокатки, но и путем гибки листа или полосы толщиной от 1 до 8 мм. Стальные гнутые швеллеры изготавливают согласно ГОСТ 8278-93 (для равнополочных) или ГОСТ 8281-80 (для не равнополочных) из рулонной стали обыкновенного качества и углеродистой качественной конструкционной стали. Высота равнополочного швеллера составляет от 50 до 400 мм, ширина – от 32 до 115 мм. Прокатные профили дешевле гнутых. Они непосредственно с металлургического завода идут на изготовление металлоконструкций. Для образования гнутых профилей требуется дополнительная операция: изготовление профиля из прокатного листа.

По сравнению с швеллерами, изготовленными прокаткой, гнутые имеют меньшую массу. Во многих случаях при проектировании сварных конструкций применению гнутых профилей отдают предпочтение. Следует иметь в виду, что гнутые профили имеют меньшую жесткость при кручении по сравнению с прокатными. Поэтому гнутые швеллеры часто используют для получения с помощью сварки замкнутых профилей коробчатого сечения.

Швеллеры используют в элементах, работающих на изгиб, на растяжение или сжатие. В конструкциях, работающих на осевые силы, швеллеры применяют в основном в виде составных сечений, соединенных планками или решеткой, например в колоннах и поясах тяжелых ферм. Возможно применение швеллеров для коробчатых сечений со сваркой полок сплошными швами. Использование прерывистых швов следует ограничивать, поскольку помимо повышенной концентрации напряжений в концах прерывистых швов в таком сечении внутренняя полость не герметизирована, что может способствовать развитию коррозии.

Профили двутаврового профиля имеют по сравнению с другими профилями наибольший удельный момент сопротивления. В зависимости от геометрических параметров металлургическими заводами выпускаются несколько типов балок двутавровых, которым соответствуют определенные области применения.

Двутавровые прокатные профили (ГОСТ 8239-89 «Двутавры



Машины и автоматизация сварочного производства

стальные горячекатаные. Сортамент»), так же, как и швеллеры, имеют уклон внутренних граней полок и обозначаются номером, соответствующим их высоте в сантиметрах. В сортамент входят профили от №10 до №70, но двутавры от № 24 до № 60 не рекомендуется применять в новых разработках. Чем тоньше стенка, тем выгоднее сечение двутавровой балки при работе ее на изгиб. Однако по условиям технологии прокатки у большинства двутавровых балок стенки получаются значительно толще, чем это требуется по условию их устойчивости. Благодаря сосредоточению материала в полках двутавровые балки имеют большую жесткость относительно оси X , но небольшая ширина полок делает их недостаточно устойчивыми относительно оси Y . Обыкновенные двутавровые балки применяют в элементах, изгибаемых в плоскости стенки, а также в ветвях решетчатых колонн и различных опор. Для обеспечения устойчивости относительно оси Y балки должны иметь промежуточные закрепления.

В соответствии с ГОСТ 26020-83 Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Сортамент выпускаются широкополочные двутавровые балки, которые имеют параллельные грани полок. Широкополочные балки прокатывают трех типов: нормальные (Б), широкополочные (Ш), колонные (К). Высота балочных профилей (Б) и (Ш) достигает 1000 мм при отношении ширины полок к высоте от $b/h=0,75$ (при малых высотах) до $b/h=0,3$ (при больших высотах). Колонные профили (К) имеют отношение ширины полок к высоте, близкое к единице, что придает им устойчивость относительно оси Y . Благодаря большей ширине полок широкополочные двутавры имеют большую жесткость относительно оси Y и могут применяться в конструкциях без дополнительных закреплений.

Конструктивные преимущества (параллельность граней полок и мощность сечений) позволяют применять широкополочные двутавровые балки в виде самостоятельного элемента (балки, колонны, стержни тяжелых ферм), не требующего почти никакой обработки, что снижает трудоемкость изготовления конструкций в 2–3 раза. Из широкополочных двутавровых балок путем разрезки стенки в продольном направлении и последующей сварки полученных тавровых профилей можно изготовить экономичные тонкостенные двутавровые балки с более выгодным распределением материала по сечению (рис. 2.16).

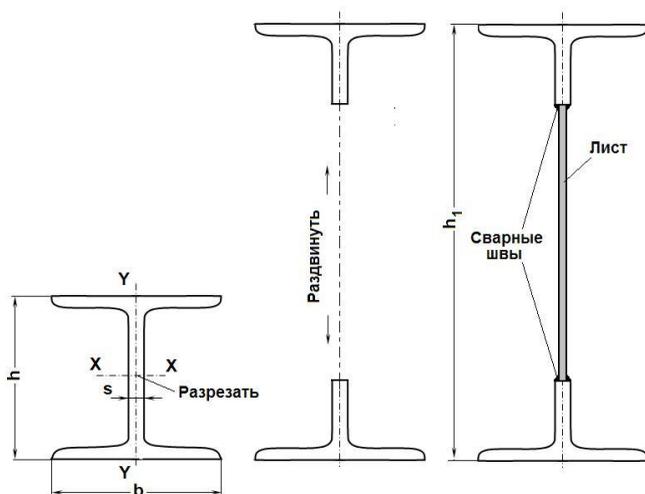


Рис. 2.16. Последовательность изготовления двутавровых балок

Широкополочные двутавры часто используют для получения элементов таврового профиля, поскольку прокат таврового профиля встречается относительно редко. По мере расширения производства широкополочных двутавровых балок применение обыкновенных двутавровых балок сокращается.

Профиль в виде уголка изготавливают двумя способами: путем горячей прокатки и путем гибки. По форме профиля сечения они могут быть равнополочные и неравнополочные. Горячекатаный прокат выпускают следующих размеров: от 20x20x3,0 мм до 250x250x30 и от 25x16x3,0 мм до 200x125x16.

Гнутые уголки выпускают размером: равнополочные – от 36x3 мм до 160x4, а неравнополочные – от 32x25x2,0 мм до 180x140x6,0 из стали с временным сопротивлением разрыву не более 460 МПа и от 40x25x2,5 мм до 155x100x6,0 для стали с временным сопротивлением разрыву более 460 МПа.

Следует обратить внимание на наиболее перспективный для применения в сварных конструкциях профиль: гнутые замкнутые сварные профили квадратного и прямоугольного сечения по ГОСТ 30245-2003.

Замкнутые тонкостенные профили имеют ряд неоспоримых преимуществ, особенно при проектировании строительных сварных конструкция типа ферм, большепролетных каркасов покрытий, огра-



Машины и автоматизация сварочного производства

ждений и др. Замкнутые профили имеют большую жесткость при работе на кручение и лучше работают на изгиб. Такие профили оказывают меньшее аэродинамическое сопротивление и, следовательно, воспринимают меньшую ветровую нагрузку. Благодаря симметрии сечения стойки из замкнутых профилей имеют большее сопротивление потери устойчивости при сжатии. Как правило, конструкции, спроектированные из такого проката, оказываются более легкими. Внутренняя полость элементов таких конструкций не соприкасается с окружающей атмосферой и не требует окраски.

При проектировании сварных соединений узлов конструкций из гнутых и гнутых замкнутых профилей необходимо учитывать некоторые конструктивные и технологические особенности. Особенности проектирования будут рассмотрены ниже.

Исходные заготовки из алюминиевых сплавов могут быть в виде листового проката и плит; профилей, полученных прокаткой и гибкой; в дополнение к этому, для получения профиля с заданным сложным сечением используют метод прессования: продавливание алюминиевой заготовки через матрицу с заданной формой сечения (прессованные профили).

Листовой прокат выпускают толщиной 0,3–10,5 мм, шириной 600–2000 мм, длиной 1000–7200 мм. Сортамент в соответствии с ГОСТ 21631-76 предусматривает для различных марок алюминиевых сплавов свой набор размеров листового проката.

Плиты в соответствии с ГОСТ 17232-99 могут иметь толщину 11–200 мм, ширину 1200–2000 мм и длину 3000–8000 мм.

Листы и плиты выпускают неплакированные, с технологической плакировкой и плакированные.

Примеры алюминиевых гнутых профилей показаны на рис. 2.17.



Машины и автоматизация сварочного производства

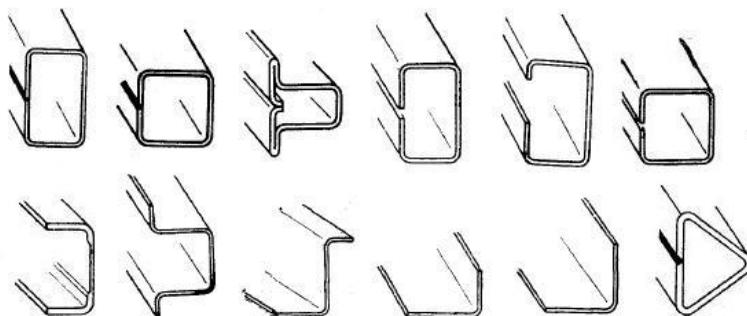


Рис. 2.17. Примеры сечений гнутых алюминиевых профилей

Следует иметь в виду, что гнутые профили имеют малую жесткость на кручение и изгиб. Они находят применение в конструкциях шасси радиоприборов, этажерок и др.

Прессованные алюминиевые профили применяются в судостроении и строительстве. Благодаря широким возможностям технологии прессования номенклатура прессованных профилей весьма разнообразна. Некоторые примеры, характеризующие возможности получения прессованных профилей сложного сечения, показаны на рис. 2.18.

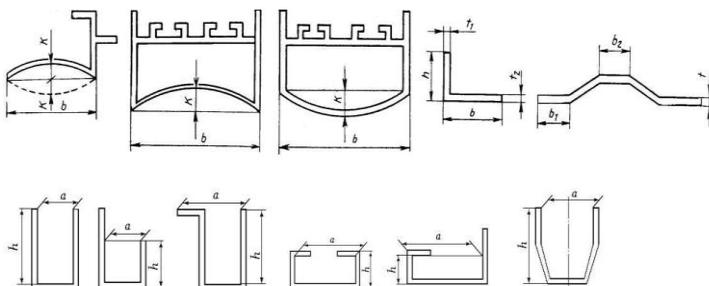


Рис. 2.18. Примеры алюминиевых прессованных профилей



Вопросы для самопроверки

1. Основные требования, предъявляемые к материалам для сварных конструкций.
2. Основные характеристики сталей.
3. Что характеризует понятие «удельная прочность»?
4. В каких типах конструкций можно наиболее эффективно использовать высокопрочные материалы?
5. С какой целью при выборе конструкционных сталей для сварной конструкции используют характеристику $C_{экв}$?
6. Можно ли определить химический состав стали на основе обозначения «сталь С345Д»?
7. Расшифруйте состав стали марки 42Х2ГСНМА.
8. Изложите преимущества и недостатки алюминиевых сплавов как конструкционного материала для сварных конструкций.
9. Что характеризуют буквы Н; М; Т1; Т в обозначении марки алюминиевых сплавов и какое значение они имеют при выборе материала для сварной конструкции?
10. Чем отличается маркировка алюминиевых сплавов в России и за рубежом?
11. Укажите преимущества и недостатки титановых сплавов как конструкционного материала для сварных конструкций.
12. Какие новые конструкционные материалы применяют для сварных конструкций?
13. Какие преимущества имеют полимерные материалы и в каких областях наиболее широко используют сварные конструкции из полимерных материалов?



3. ТИПЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

3.1. Сварные швы и соединения, выполняемые сваркой плавлением

Тип сварного соединения определяется взаимным расположением соединяемых деталей и их конфигурацией. К основным типам относятся (рис. 3.1): стыковые, нахлесточные, тавровые, угловые и торцевые (ГОСТ 2601-84).

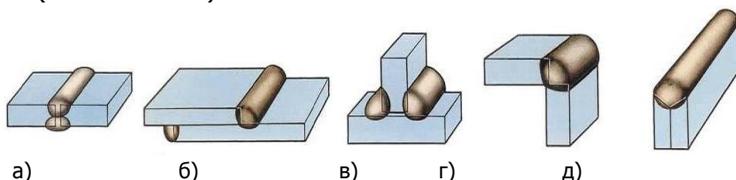


Рис. 3.1. Основные типы сварных соединений

Стыковое соединение – сварное соединение двух элементов, примыкающих друг к другу торцевыми поверхностями (рис. 3.1,а).

Нахлесточное – сварное соединение, в котором сваренные элементы расположены параллельно и частично перекрывают друг друга (рис. 3.1,б).

Тавровое – сварное соединение, в котором торец одного элемента примыкает под углом и приварен к боковой поверхности другого элемента (рис. 3.1,в). Угол наклона присоединяемого элемента обычно составляет 90° , но может быть и другим.

Угловое – сварное соединение двух элементов, расположенных под углом и сваренных в месте примыкания их краев (рис. 3.1,г).

Торцевое – сварное соединение, в котором боковые поверхности сваренных элементов примыкают друг к другу (рис. 3.1,д).

Сварные швы подразделяются на стыковые, угловые, точечные, прорезные, проплавные.

Стыковой шов – сварной шов стыкового соединения, образуемый за счет расплавления соединяемых кромок изделия с добавлением или без добавления присадочного материала. Для получения соединения равнопрочного с основным металлом сварку ведут так, чтобы обеспечить полное проплавление кромок. Плотность энергии при газовой и дуговой сварке недостаточна для проплавления металла большой толщины. Для газовой сварки за один проход можно



Машины и автоматизация сварочного производства

проплавить соединение без разделки кромок до 3 мм; для ручной дуговой и механизированной в защитных газах – 4–6 мм; для автоматической сварки под флюсом – до 12 мм. Для сварки металла большей толщины требуется либо выполнить сварку с двух сторон, либо придать кромкам специальную форму так, чтобы толщина металла в районе выполнения первого прохода не превышала допустимую для проплавления заданным способом сварки. Рекомендуемая форма кромок (разделка кромок) зависит от способа сварки и регламентируется соответствующим стандартом или отраслевым нормативным документом.

Форму разделки кромок и их сборку под сварку характеризуют три основных конструктивных элемента: зазор – b , притупление кромок – c и угол скоса кромки – ϕ (рис. 3.2). Увеличение зазора приводит к увеличению глубины проплавления и может привести к появлению прожога.

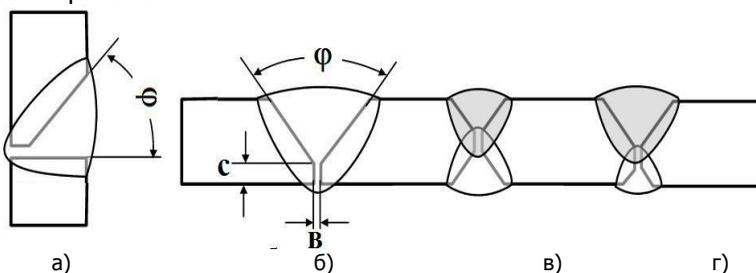


Рис. 3.2. Форма разделки кромок

При сварке неплавящимся электродом зазор устанавливают минимальной величины. При сварке плавящимся электродом он может составлять 0–5,0 мм. В некоторых случаях зазор преднамеренно увеличивают для обеспечения большей глубины проплавления, например, при автоматической сварке под флюсом.

Притупление кромок позволяет избежать прожога корня шва. Рекомендуемая величина притупления находится в пределах 0–3,0 мм, но при автоматической сварке на больших токах может иметь большую величину. Чрезмерное притупление в сочетании с малым зазором ведет к появлению непроваров.

Наиболее простым способом обеспечения доступности корня шва является скос кромки. Скос кромок обычно производят на двух соединяемых кромках (рис.3.2,б), но в некоторых случаях, например, при сварке горизонтального шва на вертикальной плоскости с целью предотвращения стекания металла, выполняют скос кромки на одной из деталей (рис.3.2,а).



Машины и автоматизация сварочного производства

Угол φ , рекомендуемый стандартами, составляет 30° – 50° в зависимости от способа сварки. При малом угле затруднено манипулирование электродом, вследствие чего возможно образование дефектов несплавления металла шва с кромкой. С увеличением угла разделки возрастает объем наплавленного металла, что увеличивает трудоемкость изготовления и остаточные сварочные деформации. Это становится особенно важно при сварке металла большой толщины, поскольку объем наплавленного металла увеличивается пропорционально квадрату толщины.

Именно по этой причине выбору оптимальной формы разделки кромок уделяют большое внимание при проектировании сварных соединений. Существует несколько путей снижения объема наплавленного металла, например, замена односторонней V-образной разделки на X-образную (рис.3.2,в) позволяет уменьшить объем наплавленного металла в 1,7 раза. Кроме того, такая разделка обеспечивает меньшую величину деформаций после сварки.

Следует иметь в виду, что X-образная разделка кромок предполагает, что один из швов необходимо будет сваривать в более трудном потолочном положении или применять кантование изделия, что увеличивает трудоемкость изготовления. Компромиссным решением может быть применение несимметричной X-образной разделки (рис.3.2,г). V-образная и X-образная разделки можно выполнить относительно дешевыми способами: кислородно-ацетиленовой или плазменной резкой. При подготовке кромок на кромкострогальных, токарных или карусельных станках им можно придать более экономную в отношении объема наплаваемого металла форму: односторонней или двухсторонней U-образной формы (рис.3.3,а,б) и с изменяющимся углом наклона. Положение точки перелома В зависит от толщины стенки S и находится в пределах от 7 до 12 мм.

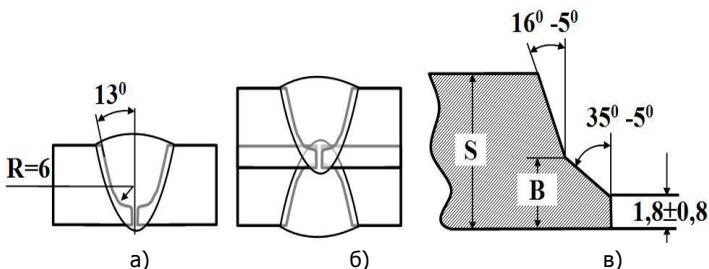


Рис. 3.3. Фигурная форма разделки кромок



Получение U-образной формы связано с большой трудоемкостью обработки, поэтому в последнее время при механизированной и автоматической сварке все шире находит применение разделка кромок с изменяющимся углом наклона (рис.3.3,в).

Наиболее экономичной в отношении объема наплавленного металла является подготовка кромок для электрошлаковой сварки. Кромки стыка обрабатывают перпендикулярно поверхности детали. Сварку выполняют при вертикальном расположении стыка с зазором между кромками 20–40 мм с принудительным формированием шва охлаждаемыми башмаками.

К сожалению, термические условия при электрошлаковой сварке могут способствовать формированию металла шва с низкими пластическими свойствами. В качестве альтернативы в настоящее время все шире применяются способы многослойной сварки деталей большой толщины с щелевой разделкой кромок. Торцы кромок обрабатывают под углом около 3° к поверхности и собирают с зазором 12–20 мм. Сварку производят в нижнем положении, послойно заполняя разделку (рис. 3.4,а). Основные сложности процесса связаны с необходимостью исключить несплавление металла шва с кромками, а при сварке под флюсом – исключить образование шлаковых включений. На рис. 3.4,б видно, насколько эффективно снижается объем наплавленного металла с увеличением толщины соединяемых деталей при замене U-образной разделки на щелевую. Наиболее ощутимый эффект начинает проявляться при сварке металла толщиной более 40 мм.

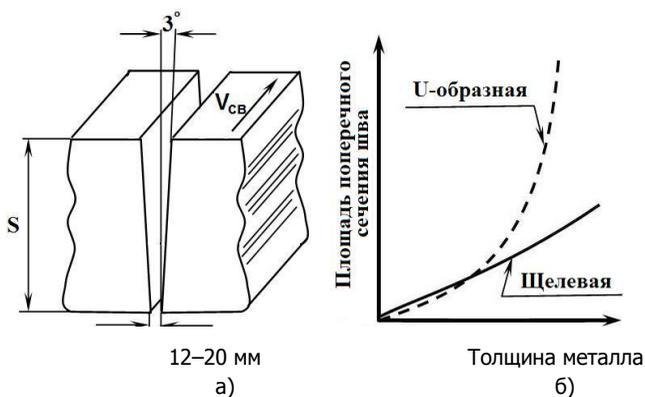


Рис. 3.4. Щелевая разделка кромок (а) и снижение объема наплавленного металла при ее применении (б)



Поскольку сварка проводится при значительно меньшей погонной энергии по сравнению с электрошлаковой сваркой, пластические свойства металла шва оказываются значительно выше. Несмотря на несомненные преимущества щелевой разделки, при проектировании сварных соединений следует принимать во внимание, что сварка таких соединений требует чрезвычайно высокой технологической культуры предприятия. В противном случае появление дефектов в сварном соединении весьма вероятно.

Для сварки тонколистового металла толщиной 0,5–4,0 мм стандарты предусматривают швы, выполняемые по отбортованным кромкам (рис. 3.5, а, б).

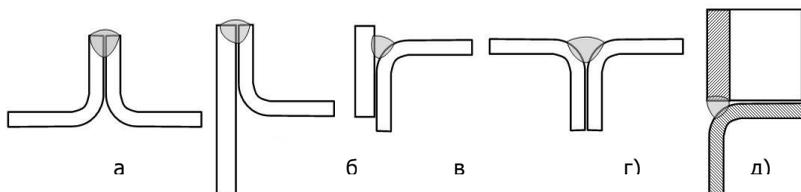


Рис. 3.5. Соединение по отбортованным кромкам (а, б) и деталей с закругленными кромками (в, г, д)

Сварной шов между закруглённым и плоским элементами или между двумя деталями с закругленными кромками (рис. 3.5, в, г, д) рекомендуются стандартом для деталей толщиной до 12 мм, но на практике применяется и для соединения больших толщин.

Угловой шов – шов углового, нахлесточного или таврового соединений.

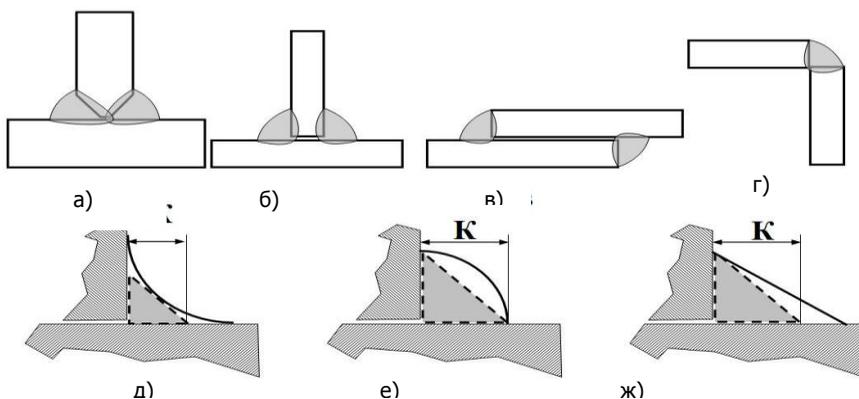


Рис. 3.6. Соединения с угловыми швами



Машины и автоматизация сварочного производства

Угловые швы проектируют в зависимости от толщины металла и условий эксплуатации без разделки кромок (рис. 3.6,б) или с разделкой кромок (рис. 3.6,а). Швы могут быть выпуклыми или вогнутыми, иметь одинаковые катеты или различные. Независимо от формы шва во всех случаях в расчет принимают минимальное значение катета равнобедренного вписанного треугольника. Форму и размеры кромок деталей и сварного шва регламентируют стандарты.

Вопросам оптимального проектирования сварных соединений с угловыми швами необходимо уделять повышенное внимание, поскольку завышение или занижение размеров швов приводит к существенным экономическим потерям. Данные ИЭС им Е.О. Патона свидетельствуют, что в целом по объему металла, наплавляемого при производстве сварных конструкций, на долю угловых швов приходится 70–90 %; трудоемкость сварки составляет 1ч-час на 1кг наплавленного металла; расход электроэнергии – 2,5 кВт·ч на 1кг наплавленного металла; более 40% угловых швов требуют расчета на прочность.

Обоснованное расчетом назначение размера катета шва и формы разделки кромок соединения с угловыми швами следует рассматривать как основные пути обеспечения экономической эффективности производства сварных конструкций.

По протяженности швы различают сплошные (прямолинейные, выполненные по не замкнутому контуру или по замкнутому контуру) и прерывистые. Прерывистые швы по взаимному расположению могут быть цепными или шахматными.

По отношению к направлению действующих усилий швы подразделяются на продольные (для нахлесточных соединений – фланговые), поперечные (для нахлесточных соединений – лобовые), косые и комбинированные, а также передающие нагрузку (рабочие) и не передающие нагрузку (связующие).

В зависимости от способа формирования обратной стороны корня шва сварные соединения различают: соединения, выполненные без формирующих элементов (*на весу*) и с формирующими элементами. В качестве элементов, формирующих корень шва, применяют: *флюсовые подушки, съемные медные или керамические подкладки, остающиеся металлические подкладки*, которые после сварки является частью сварного соединения, но могут быть удалены с помощью механической обработки. К соединениям на подкладке можно отнести соединение, в котором функции формирующей подкладки выполняет выступ на одной из свариваемых кромок.



Машины и автоматизация сварочного производства

Доступность шва к выполнению сварки, возможность применения того либо иного способа сварки, технологичность конструкции существенно зависит от расположения шва в пространстве.

Сварные швы подразделяются также по положению в пространстве (ГОСТ 11969-79): нижнее – Н; в лодочку – Л; полугоризонтальные – П_г; горизонтальные – Г; полувертикальные – П_в; вертикальные – В; полупотолочные – П_п; потолочные – П.

В международной практике (ISO 6947 или ASME Section IX) принято более детализированное обозначение положения шва при сварке (рис. 3.7.).

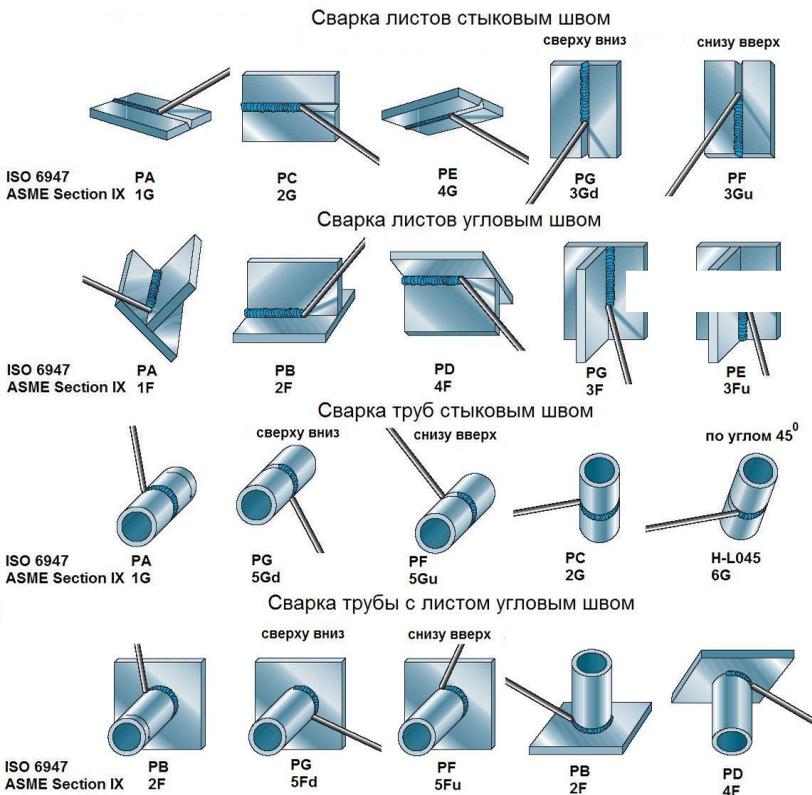


Рис. 3.7. Условное обозначение положения при сварке

В международных стандартах учитывается различие между сваркой вертикальных швов снизу вверх и сверху вниз, что важно, поскольку технология сварки таких швов может различаться



Машины и автоматизация сварочного производства

Конструктивные элементы сварного соединения, включающие форму и геометрические размеры кромок, подготовленных к сварке, размеры сечения шва определяются стандартами в зависимости от способа сварки. Для каждой формы сечения сварного соединения стандарты предусматривают буквенно-цифровое условное обозначение. Буква указывает на тип соединения, например, С – стыковое; Н – нахлесточное; а цифра – форму поперечного сечения подготовленных кромок в соответствии со стандартом. К сожалению, одна и та же цифра в разных стандартах может обозначать разную форму шва.

Соединение внахлестку со сквозным проплавлением элемента (рис. 3.8). Существует две разновидности швов таких соединений: *проплавные*, когда один из элементов проплавляют насквозь так, чтобы получить соединение между двумя или несколькими элементами, собранными внахлестку, протяженным швом (поз. 3, рис. 3.8) или на отдельных участках (например, дуговой точечный шов, поз. 1, рис. 3.8); *прорезные*, когда перед сваркой в верхнем элементе выполняют сквозное отверстие круглой или вытянутой формы (поз. 2, рис. 3.8), затем отверстие заваривают так, чтобы получить соединение с нижележащим элементом.

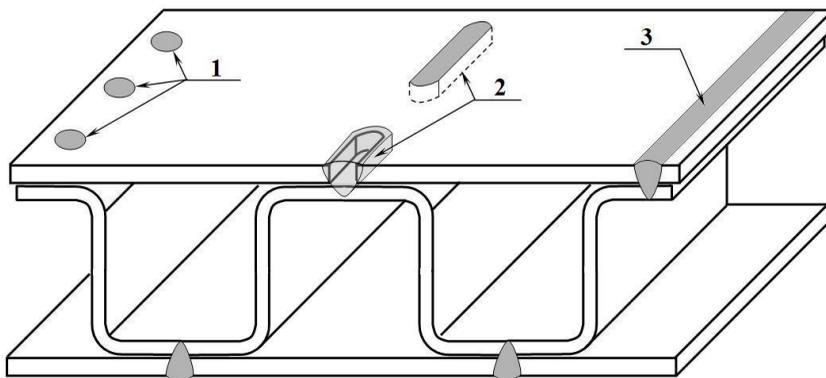


Рис. 3.8. Нахлесточное соединение с полным проплавлением верхнего элемента:

1 – дуговой точечный шов; 2 – прорезной шов; 3 – проплавной шов

Сварные соединения внахлестку со сквозным проплавлением элемента находят широкое применение для конструкций, сварку которых предполагается выполнять с использованием источников энер-



Машины и автоматизация сварочного производства

гии с высокой плотностью ввода энергии, таких как электроннолучевая сварка, лазерная и гибридная сварка.

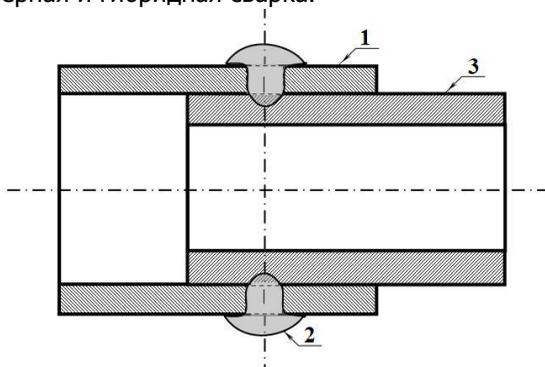


Рис. 3.9. Дуговые точечные швы, выполненные через отверстие:
1 – чугун (сталь); 2 – металл дугового точечного шва;
3 – сталь (алюминий)

Нахлесточные соединения, выполняемые через отверстие в верхнем листе, используют для соединения деталей из разнородных трудно свариваемых между собой конструкционных материалов. Таким способом можно получить нахлесточное соединение (рис. 3.9) сталь – чугун, алюминий – сталь. Для получения соединения по данной технологии процесс сварки ведут так, чтобы шов 2 не расплавлял металл детали 1.

3.2. Сварные швы и соединения, выполняемые контактной сваркой

Различают швы (рис. 3.10), выполняемые контактной точечной (K_T), рельефной (K_P) и шовной ($K_{Ш}$) сваркой (ГОСТ 15878-79).

Точечный шов образуется за счет расплавления металла между соединяемыми поверхностями листов, собранных внахлестку. При рельефной сварке для концентрации тока и локализации нагрева на одной из деталей перед сваркой выдавливают выступ (рельеф). При сварке выступ расплавляется, образуя литое ядро. При шовной сварке отдельные сварные точки перекрывают друг друга, образуя протяженное герметичное соединение. При шовной контактной сварке величина перекрытия литых зон герметичного шва f (рис. 3.10) должна быть не менее 25% длины литой зоны шва l .



Машины и автоматизация сварочного производства

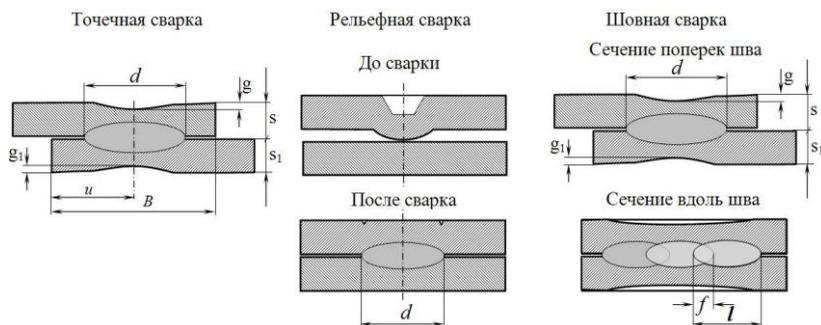


Рис. 3.10. Сечение соединений, выполняемых контактной сваркой:
 d – расчетный диаметр (ширина) рабочего сечения точки (шва);
 B – ширина нахлестки; l – длина литой зоны шва;
 f – величина перекрытия литых зон шва

Диаметр литого ядра при точечной и рельефной сварке или ширину литой зоны в поперечном направлении при шовной сварке принимают в качестве расчетного значения сечения при определении прочности соединения.

Точечные соединения располагают рядами или в шахматном порядке (рис. 3.11).

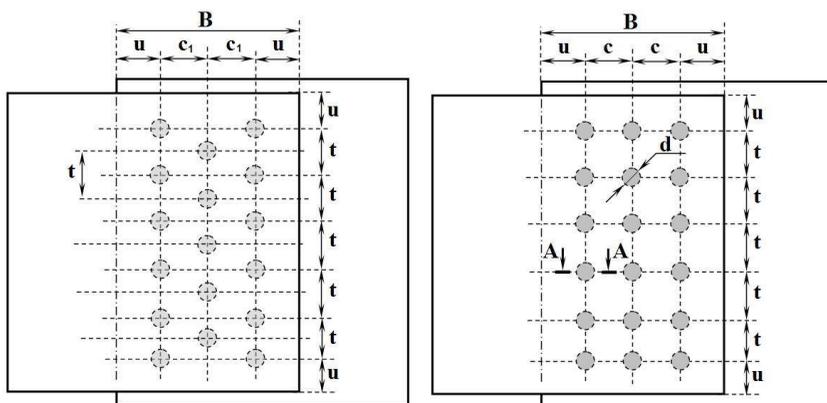


Рис. 3.11. Расположение сварных точечных швов
 (сечение А – А показано на рис. 3.10)

Конструктивные элементы сварных соединений, их размеры приведены в ГОСТ 15878-79. Стандарт предусматривает две группы размеров: группу А и группу В. Группу соединения устанавливают при проектировании в зависимости от требований к сварной конст-



Машины и автоматизация сварочного производства

рукции и особенностей технологического процесса сварки.

Величина нахлестки B для многорядных швов при цепном расположении точек $B = 2u + c(n-1)$; при шахматном расположении точек $B = 2u + c_1(n-1)$, где n – число рядов точек, $c_1 \geq 0,8c$, $u \geq 0,5B$.

Допускается сварка деталей неодинаковой толщины, при этом размеры конструктивных элементов следует выбирать по детали меньшей толщины.

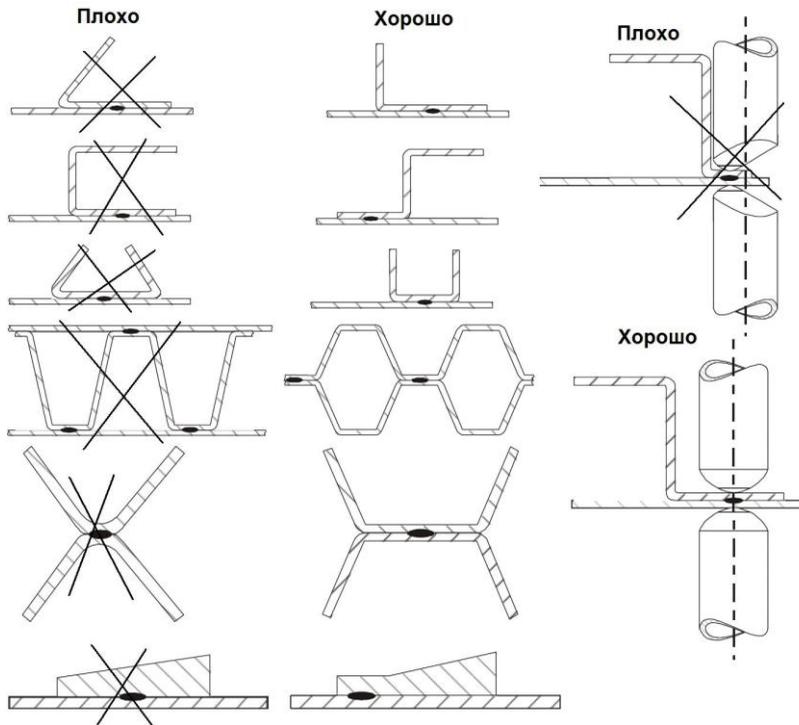


Рис. 3.12. Обеспечение технологичности контактной сварки на стадии проектирования

В случае $S > 2S_1$ минимальные величины нахлестки B , расстояние между центрами соседних точек в ряду t и расстояние между осями соседних рядов точек следует увеличить в 1,2–1,3 раза.

При сварке трех и более деталей расчетный диаметр литого ядра точки d следует устанавливать отдельно для каждой пары сопрягаемых деталей. Допускается сквозное проплавление средних деталей. Глубина вмятины g , g_1 не должна быть более 20% толщины детали.



Машины и автоматизация сварочного производства

При проектировании сварных соединений следует придерживаться рекомендаций по размещению сварных соединений (рис.3.12) для улучшения технологичности выполнения сварки.

3.3. Сварные швы соединений из двухслойных коррозионно-стойких сталей

Основные типы конструктивных элементов швов сварных соединений из двухслойной коррозионно-стойкой стали, выполняемых дуговой и электрошлаковой сваркой, приведены в ГОСТ 16098-80. Стандарт не распространяется на сварные соединения из трехслойной стали, других видов двухслойной стали (износостойкой и др.), а также на соединения двухслойной коррозионно-стойкой стали с углеродистой, низко- или высоколегированной сталью.

В стандарте приняты следующие условные обозначения способов сварки:

Р – ручная дуговая сварка металлическим покрытым электродом;

АФ – автоматическая дуговая сварка под флюсом без применения подкладок;

АФф – автоматическая дуговая сварка под флюсом на флюсовой подушке;

З – дуговая сварка в защитных газах;

Ш – электрошлаковая сварка.

Обозначение способа сварки представлено в виде дроби, числитель которой соответствует способу сварки основного слоя, а знаменатель – плакирующего.

На рис. 3.13 приведен пример стыкового соединения элементов конструкций из двухслойных сталей.

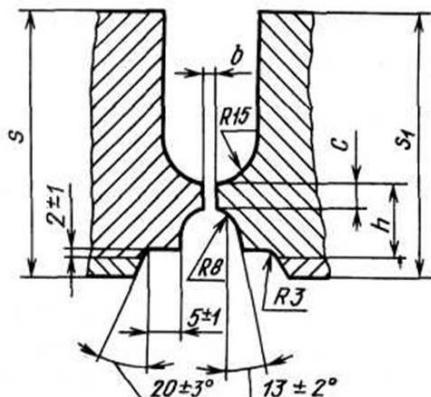


Рис. 3.13. Пример подготовки кромок для сварки встык двухслойной стали

Отличительной особенностью подготовки двухслойной стали является то, что металл плакирующего слоя удаляют на большую ширину, чем ширина разделки основного слоя. Это необходимо для того, чтобы уменьшить перемешивание перлитного металла с аустенитным при сварке облицовочного шва.

При сварке встык допускается смещение кромок относительно друг друга на величину до 10 % от толщины листа, но не более 3 мм со стороны основного слоя и не более половины толщины плакирующего. При сварке встык листов неодинаковой толщины разность толщин листов не должна превышать величины 1–4 мм в зависимости от толщины деталей. Подготовка кромок под сварку должна проводиться так же, как для листов одинаковой толщины; конструктивные элементы подготовленных кромок и размеры выполненного шва сварного соединения выбирают по большей толщине. Листы должны выравниваться по границе основного и плакирующего слоев или по наружной поверхности плакирующего слоя.

3.4. Сварные соединения изделий из термопластов

Из всего разнообразия полимеров свариваться с хорошим качеством могут только термопласты. Сварка предполагает нагрев участков соединяемых поверхностей до вязкотекучего состояния (условно до плавления) и взаимное перемещение нагретых участков материала за счет давления, прикладываемаемого к соединяемым дета-



Машины и автоматизация сварочного производства

лям.

Нагрев осуществляют за счет внешнего теплоносителя или за счет генерации тепла в результате, например, трения соединяемых поверхностей.

Сварку производят как без дополнительного материала, за счет объединения расплавленного материала свариваемых поверхностей, так и с присадочным материалом, который добавляют в шов, предварительно нагрев его до вязкотекучего состояния. Как в первом, так и во втором случае для получения сварного соединения необходимо прикладывать давление.

Хорошо свариваются между собой только термопласты одинакового химического состава с близким индексом текучести расплава.

Для достижения удовлетворительного качества сварного шва необходимо производить очистку соединяемых поверхностей. Свариваемые поверхности должны быть очищены от загрязнений, особенно от масла или другого жира.

При хранении внешний слой полимера подвергается ультрафиолетовому разрушению, что ухудшает свариваемость, поэтому непосредственно перед сваркой необходимо производить очистку соединяемых поверхностей. Предпочтение отдают механической очистке. В случае сварки нагретым инструментом требование к чистоте поверхностей распространяется также на нагретый инструмент, который должен быть очищен метиловым спиртом с применением неволокнистой ветоши.

Из полимерных конструкций, изготавливаемых с помощью сварки, наибольшее применение нашли трубопроводы систем газораспределения, холодной и горячей воды и напорной канализации.

Для этих конструкций применяют три вида сварных соединений: встык нагретым инструментом (рис. 3.14,а,б), нагретым инструментом внахлестку (враструб, рис. 3.14,б) и внахлестку с использованием дополнительных деталей с закладными нагревателями (рис.3.14,в,г).



Машины и автоматизация сварочного производства

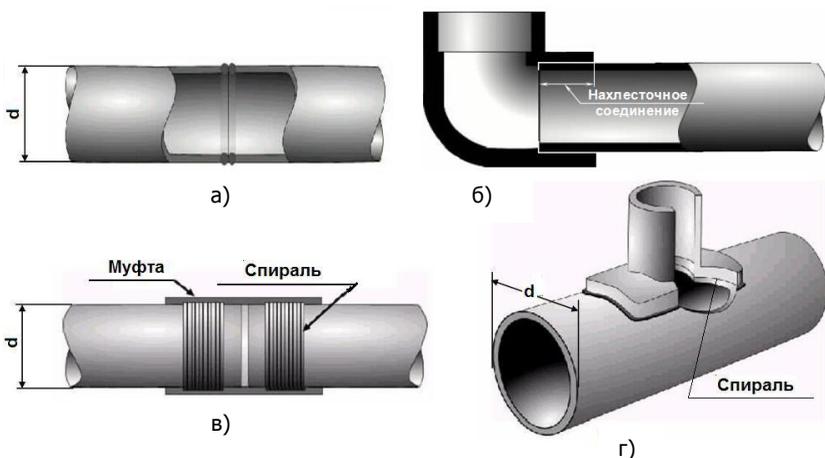


Рис. 3.14. Типы сварных соединений полимерных труб

При сварке встык торцы соединяемых труб нагревают до расплавления материала и сдавливают, удерживая давление до полного остывания стыка. Расплавленный материал торцов выдавливается и образует грат вокруг сварного шва.

При сварке внахлест одновременно нагревают наружную поверхность трубы и внутреннюю поверхность раструба соединяемых деталей. После достижения заданной температуры конец трубы вручную вводят с натягом внахлест и выдерживают в неподвижном состоянии до полного охлаждения деталей и образования нахлесточного соединения. Раструбная сварка наиболее часто применяется при монтаже трубопроводов из полипропилена сравнительно небольших диаметров – до 40–50 мм включительно. Для облегчения сборки и обеспечения качества сварки труб диаметром больше 50 мм лучше использовать специальные центраторы для раструбной сварки. Для систем газораспределения этот способ сварки не разрешен.

При сварке внахлестку с использованием деталей с закладными нагревателями соединяемые детали вводят в специальную муфту, внутри которой размещены нагревательные элементы в виде спиралей (рис. 3.14,в). После сборки через спирали пропускают ток. Соединяемые поверхности нагреваются до расплавления, образуя сварное соединение. Температурное расширение трубы создает давление, вызывающее перемещение расплава в зоне соединения. Избыток расплава выдавливается через специальные отверстия в муфте, что является индикатором успешного выполнения сварки.



Машины и автоматизация сварочного производства

Разновидностью этого метода является соединение седельных отводов с трубами (рис. 3.14,г). В данном случае закладные нагреватели размещают на поверхности седельных отводов. Для обеспечения необходимого давления в процессе сварки седельный отвод необходимо прижимать к трубе.

Получаемые в результате сварные швы не имеют зон термически поврежденного материала. Поэтому все рассмотренные методы сварки позволяют получить прочность соединения не ниже, чем прочность исходной трубы, если в процессе сварки точно выполнены все технологические рекомендации в отношении подготовки кромок, сборки и сварки.

Соединение листовых деталей между собой или листов с трубами выполняют с помощью нагрева горячим газом (воздухом) – Г или применяют экструзионную сварку – Э.

Основные типы, конструктивные элементы и размеры сварных соединений из полиэтилена, полипропилена и винилпласта, выполняемых этим способом, определены ГОСТ 16310-80. Стандарт предусматривает стыковые, тавровые, угловые и нахлесточные соединения деталей толщиной 2–20мм. Сварку листов встык без разделки кромок толщиной 2–4мм выполняют только способом Г. Для соединения деталей большей толщины используют оба способа сварки (Г и Э) и применяют односторонний или двухсторонний скос кромок под углом 45° – 50° (односторонний) и 30° – 35° (двухсторонний).

При сварке с нагревом горячим газом через сопло проходит газ, который нагревает материал свариваемых кромок и присадочный пруток до вязкотекучего состояния, а давление, прикладываемое носиком сопла к присадочному материалу, формирует сварной шов. Свариваемые поверхности и прилегающие к ним зоны перед сваркой следует очистить помощью скребка. Рекомендуется также механическая очистка сварочного прутка.

В случае доступности шва с обеих сторон для деталей толщиной 4 мм и более рекомендуется двустороннее соединение, а для деталей толщиной 6 мм и более сварка с двух сторон требуется обязательно (рис. 3.15).



Рис. 3.15. Многослойная сварка термопластов нагретым газом



Машины и автоматизация сварочного производства

Первый проход шва рекомендуется выполнять прутком $\varnothing 3$ мм, за исключением сварки деталей толщиной 2 мм. Последующие проходы можно выполнять прутком большего диаметра. Перед очередным проходом необходимо очистить поверхность предыдущего прохода подходящим скребком.

Экструзионная сварка двух деталей заключается во впрыскивании расплавленного присадочного материала в зону сварки. Перед впрыскиванием присадочного материала поверхности соединяемых деталей в зоне сварки нагревают до вязкотекучего состояния. С этой целью экструдер снабжен нагревателем воздуха. Горячий воздух подается в зону сварки через специальное сопло. Присадочный материал в виде гранул, проходя через экструдер, нагревается, расплавляется и перемешивается до гомогенного состояния. В некоторых типах экструдеров используется присадочный материал в виде прутков.

Пластифицированный присадочный материал подается в зону шва через сварочный башмак. Башмак прижимает присадочный материал и сообщает ему давление, необходимое для сварки. Одновременно с этим башмак формирует шов и сглаживает его поверхность. Таким образом, сварочный башмак должен соответствовать форме и размеру предполагаемого сечения сварного шва. При экструзионной сварке шов формируют за один проход с каждой стороны.

Перед проведением сварки двух листов их кромки должны быть скошены таким образом, чтобы угол раскрытия шва составлял 45–90° – меньший угол для более толстых листов и больший угол для тонких листов. Угол раскрытия должен быть достаточно большим, чтобы вязкотекучий материал уверенно заполнил всю зону шва. Ограничение угла раскрытия для более толстых листов вызвано тем, что общая ширина шва, включая зоны перекрытия швом кромок на поверхности соединения, должна быть не более 30 мм. В противном случае оператор не сможет прижать сварочный башмак с требуемым усилием, гарантирующим, что присадочный материал не будет выступать за зону опоры сварочного башмака. В корневом слое шва необходимо оставить притупление кромок толщиной до 1 мм. В противном случае малейшая неравномерность продвижения экструдера вызовет неравномерное оплавление корневого слоя горячим воздухом и, как следствие, заметную неравномерность ширины зазора между свариваемыми листами. Перед сваркой листы необходимо зафиксировать друг относительно друга, оставив между ними зазор шириной до 2 мм. В этом случае присадочный материал будет немного выдавливаться на противоположную сторону листов, гарантированно



Машины и автоматизация сварочного производства

проваривая корневой слой. Подготовка кромок должна производиться непосредственно перед проведением сварки, так как поверхность многих термопластов быстро окисляются на воздухе. Кроме того, даже небольшое запыление или другое загрязнение свариваемых поверхностей может отрицательно повлиять на прочность шва. Если после подготовки кромок прошло более 20 минут, следует очистить поверхности и сразу приступить к сварке. Для очистки кромок используют скребки. Очистку необходимо провести также и на верхней плоскости листов, на расстоянии не менее 2 мм от скоса кромок.

Экструзионная сварка и сварка горячим воздухом в основном применяется при изготовлении пластмассовых конструкций типа емкостей и резервуаров. Поскольку прочность сварного соединения не превышает 60 % от прочности использованного материала, то данные способы сварки не применяют для напорных трубопроводов газоснабжения и водоснабжения.

Прочность сварных соединений существенно зависит от типа соединения, расположения швов в конструкции и их ориентации по отношению к направлению действия растягивающих напряжений (рис. 3.16).



Машины и автоматизация сварочного производства

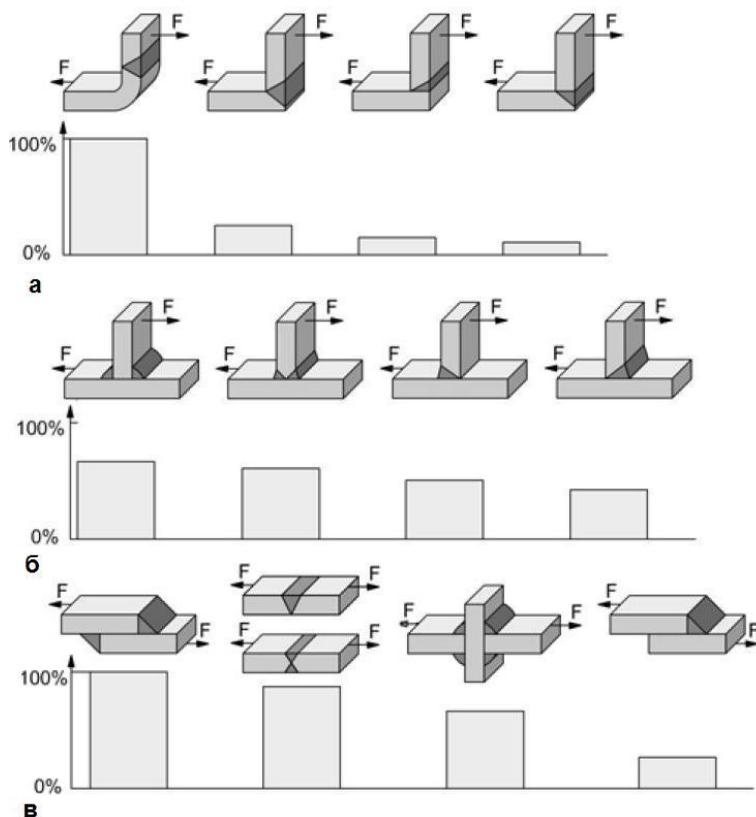


Рис. 3.16. Влияние конструкции и расположения швов на прочность сварных соединений термопластов: а – угловые; б – тавровые; в – нахлесточные

Экструзионную сварку и сварку горячим воздухом применяют для соединения тонких полимерных полотнищ, называемых геомембранами. Обычно такие полотнища используют в качестве гидроизоляции при сооружении оросительных систем, искусственных водоемов. Их подстилают под днище вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов с целью повышения экологической безопасности таких конструкций.

Сварные соединения геомембран выполняют внахлестку (рис.3.17)⁹.

⁹ Стандарт Немецкого сварочного общества DVS 2225-1.



Машины и автоматизация сварочного производства

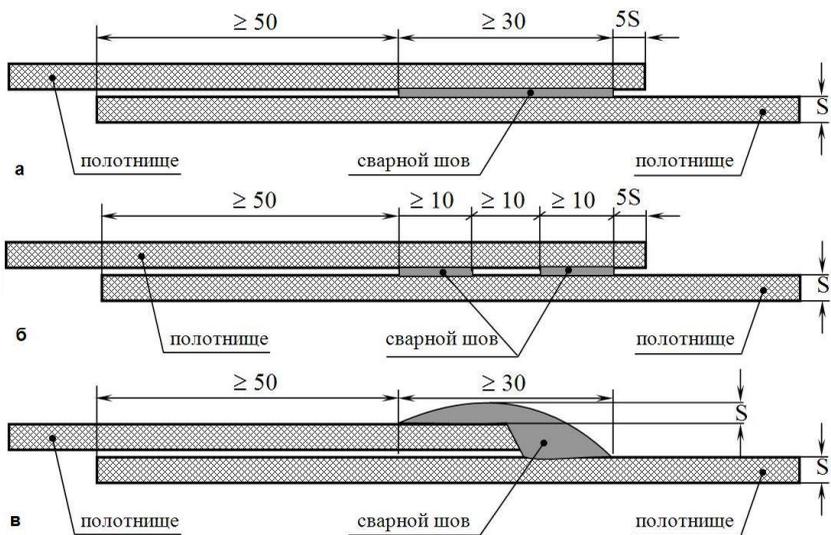


Рис. 3.17. Сварные соединения полимерных полотнищ

Соединения, показанные на рис. 3.17,а,б, выполняют сваркой нагретым воздухом. Сопло сварочной головки перемещается между двумя краями полотнищ, собранных внахлестку, и горячий воздух из сопла нагревает материал на свариваемых поверхностях до температуры перехода в вязкотекучее состояние. Следующие за соплом ролики прижимают полотнища друг к другу. Соединение типа рис. 3.17,б позволяет производить контроль герметичности сварного шва. С этой целью при сварке между двумя параллельными швами, которые выполняют одновременно, оставляют канал. После завершения сварки в него подают сжатый воздух и определяют место нарушения герметичности.

Соединения, представленные на рис. 3.17,в выполняют экструзионной сваркой. Такое соединение удобно использовать при выполнении ремонта путем наложения заплат.



Машины и автоматизация сварочного производства

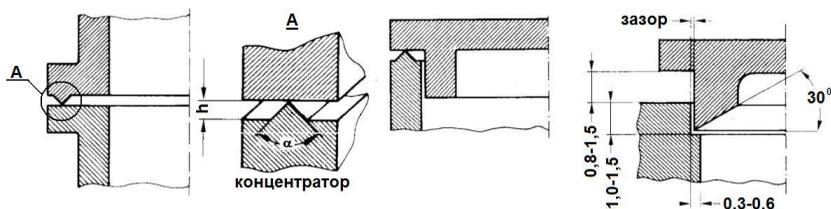


Рис. 3.18. Подготовка кромок для ультразвуковой сварки

Для соединения относительно некрupных по размеру деталей сложной формы используют ультразвуковую сварку. Энергия ультразвуковых колебаний вызывает перемещение деталей друг относительно друга, что приводит к нагреву материала поверхностей соединяемых деталей до температуры перехода в вязкотекучее состояние и их сварку под влиянием осевого давления. Для концентрации энергии в зоне сварки на поверхности одной из деталей выполняют выступ треугольной формы (концентратор) с углом $\alpha = 30^\circ - 60^\circ$ (рис. 3.18)¹⁰. Высота выступа h составляет $1/5 - 1/10$ от ширины соединяемой поверхности.

3.5. Условные обозначения сварных соединений на чертежах

Условное обозначение сварных соединений на чертежах является наиболее простым способом передачи информации от конструктора к изготовителю, позволяющим однозначно толковать требования к конструктивным элементам сварного соединения и их геометрии. Нередко условные обозначения включают дополнительную информацию технологического характера. Стандарты на условные обозначения позволяют гарантировать полное понимание изготовителем требований проекта. Существующие стандарты имеют близкую структуру формирования условных обозначений, но имеют некоторые отличительные особенности.

В России и странах СНГ принята структура условного обозначения на чертежах в соответствии с ГОСТ 2.312-72. Условные изображения и обозначения швов сварных соединений (рис. 3.19).*

¹⁰ Стандарт Немецкого сварочного общества DVS 2216-2.



Машины и автоматизация сварочного производства

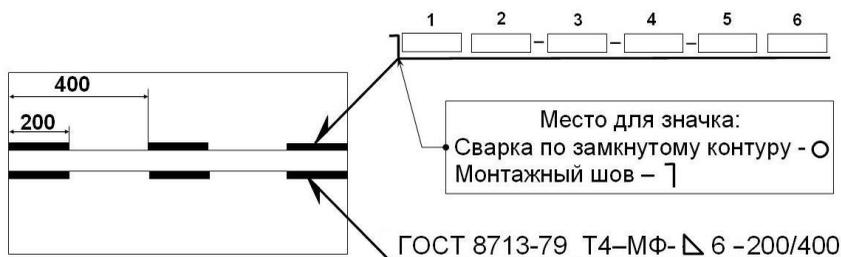


Рис.3.19. Обозначение сварных швов на чертежах

Шов сварного соединения, независимо от способа сварки, условно изображают линией (на рис. 3.19 черные прямоугольники выполнены с отступлением от стандарта с целью обеспечения большей наглядности примера), видимой сплошной линией, если шов виден на данной проекции, или невидимой штриховой линией в противном случае.

Видимую одиночную сварную точку, независимо от способа сварки, условно изображают знаком «+», который выполняют сплошными линиями. Невидимые одиночные точки не изображают.

От изображения шва или одиночной точки проводят линию-выноску, заканчивающуюся односторонней стрелкой. Линию-выноску предпочтительно проводить от изображения видимого шва.

На линии-выноске размещают условные обозначения. На *первой позиции* (1 на рис. 3.19) располагают номер стандарта, определяющего конструктивные элементы сварного соединения.

На *второй позиции* – буквенно-цифровое обозначение типа шва в соответствии со стандартом; на *третьей позиции* – условное обозначение способа сварки по данному стандарту (допускается не указывать); на *четвертой* – условное обозначение углового шва и размер его катета; на *пятой* – знаки и размеры, характеризующие размещение прерывистых швов; на *шестой позиции* размещают вспомогательные знаки (рис. 3.20), обозначающие обработку поверхности шва или знак сварки по незамкнутому контуру.



Машины и автоматизация сварочного производства

	— Усиление шва снять
	— Наплывы и неровности шва обработать с плавным переходом к основному металлу
	— Шов выполняется при монтаже изделия
	— Шов прерывистый с цепным расположением
	— Шов прерывистый с шахматным расположением
	— Шов по незамкнутой линии

Рис. 3.20. Специальные знаки условных обозначений сварных швов на чертежах (ГОСТ 2.312-72*)

На пересечении стрелки и линии-выноски может быть помещен знак, указывающий на то, что сварку необходимо выполнить по замкнутому контуру, и/или знак, указывающий на то, что сварку данного шва выполняют на монтаже (пример показан на рис. 3.19).

Под стрелкой линии-выноски могут быть помещены указания в отношении контроля качества шва. В том случае, когда на чертеже показано несколько однотипных швов, над стрелкой линии-выноски могут быть помещены номер шва и количество швов данного типа.

Если стрелка линии-выноски указывает на видимый шов, знаки условного изображения наносят над линией-выноской, если стрелка подведена к невидимому шву – под ней.

Если обработка поверхности шва производится с двух сторон сварного соединения, соответствующий знак размещается над и под линией-выноской, там же размещают знак требуемой шероховатости обработанной поверхности.

В странах Евросоюза принята структура условного обозначения сварных соединений на чертежах в соответствии со стандартом EN 22553 – Соединения сварные и паяные. Расположение символов в соответствии с данным стандартом представлено на рис. 3.21. Данный стандарт идентичен ISO 2553:1992.



Машины и автоматизация сварочного производства

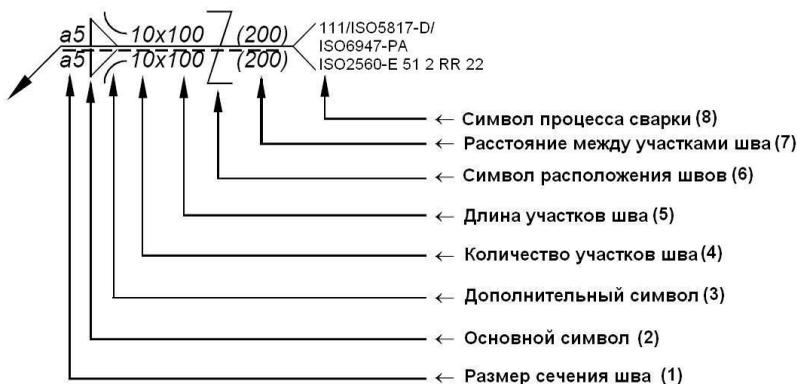


Рис. 3.21. Структура условного обозначения сварных соединений в соответствии с ISO 2553

Структура обозначения отличается от принятой в России, как по характеру начертания, так и по содержащейся в обозначении информации. Линия-выноска имеет двухстороннюю стрелку и дополнительную штрихпунктирную линию, которая может располагаться над или под основной линией. В конце основная линия имеет разветвление. Линию-выноску допускается располагать как со стороны видимого шва, так и со стороны невидимого шва. Каждый тип сварного шва (разделки кромок) имеет свой основной символ (рис. 3.22), который располагают на линии-выноске (позиция 2).

Перед основным символом (рис. 3.22) размещают знак, характеризующий размер шва по толщине. Для стыкового соединения это может быть толщина свариваемых кромок при сварке с полным проплавлением или толщина шва при сварке с неполным проплавлением. В России величину катета обозначают K , в международных нормативных документах – Z . В России расчетное сечение шва определяют

$$h = \frac{K}{N2},$$
 аналогичную величину в международных стандар-

тах
$$a = \frac{Z}{N2}.$$
 Справа от основного символа указывается длина шва

для непрерывного шва, или длина /отдельных участков шва (позиция 5) и их количество n (позиция 4) для прерывистого шва обозначается как $n \times l$.



Машины и автоматизация сварочного производства

- ⌋ – **Стыковой шов с отбортовкой**
- || – **Стыковой шов без скоса кромок**
- ∨ – **Стыковой шов с V-образной разделкой кромок**
- ∕ – **Стыковой шов со скосом одной кромки**
- Υ – **Стыковой шов с V-образной разделкой кромок и широким притуплением**
- ┘ – **Стыковой шов со скосом одной кромки и широким притуплением**
- ∪ – **Стыковой шов с криволинейным скосом двух кромок**
- ∩ – **Стыковой шов с криволинейным скосом одной кромки**
- ∩ – **Подварочный шов**
- △ – **Угловой шов**

Рис. 3.22. Основной символ в условном обозначении типа сварного шва

Над основным символом могут размещаться дополнительные символы, указывающие на специальные требования к форме поверхности шва (вогнутая, выпуклая, заподлицо с поверхностью основного металла, обработанная инструментом с заданной шероховатостью).

Позицию 6 занимает знак расположения отдельных участков прерывистого шва (цепное или шахматное). На позиции 7 указывается расстояние между отдельными участками прерывистого шва. Необходимо обратить внимание, что в отличие от ГОСТ 2.312-72, в данном случае указывают расстояние между участками шва, а не шаг между участками сварных швов.

В конце линии-выноски в устье разветвления (позиция 8, рис.3.21) располагают кодированную информацию о способе сварки (в соответствии с ISO 4063), требования к уровню качества (в соответствии с ISO 5817 или ISO 10042), положение при сварке (в соответствии с ISO 6947)¹¹, присадочные материалы и другую информацию в отношении технологии сварки, например, номер технологической карты.

На пересечении линии – стрелки и линии – выноски могут быть размещены знаки, предписывающие выполнение сварки на монтаже (рис.3.23,а) или по замкнутому контуру (рис.3.23,б).

¹¹ Более подробно см. в книге В.Ф. Лукьянов, А.Н. Жабин, А.И. Прилуцкий. Нормативная база технического регулирования в сварочном производстве. – М.: Бюро промышленного маркетинга, 2008. – 302 с.



Машины и автоматизация сварочного производства

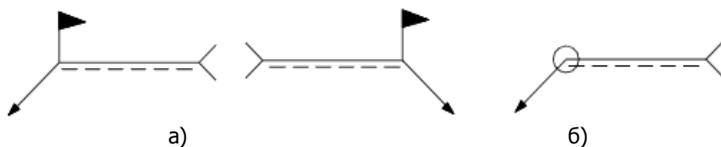


Рис. 3.23. Знаки, предписывающие сварку на монтаже (а) и по замкнутому контуру (б)

При односторонней сварке расположение знака вида сварного шва на линии – выноске показывает, с какой стороны выполнен шов. Если знак вида сварного шва прикреплен к сплошной линии-выноске, то шов следует выполнять с той стороны, куда указывает стрелка (рис. 3.24,а). Если знак вида сварного шва прикреплен к пунктирной линии-выноске, то шов следует выполнять с противоположной стороны по отношению к стрелке (рис. 3.24,б).

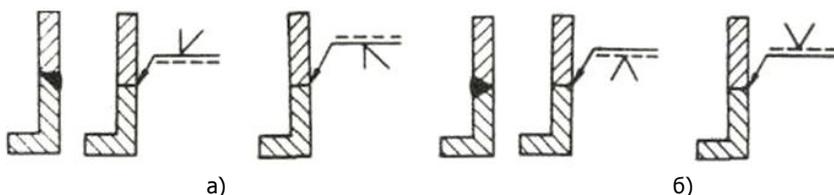


Рис. 3.24. Расположение шва по отношению к стрелке-выноске

Пунктирная линия может быть изображена либо над сплошной чертой, либо под ней. Для обозначения симметричных швов пунктирную линию допускается не изображать. Если швы не симметричные, то все знаки, прикрепленные к сплошной черте, относятся к той стороне детали, куда указывает стрелка, а знаки, прикрепленные к пунктирной черте, относятся к противоположной стороне.

В стандарте есть два символа, указывающие на то, что сварка выполняется на съемной (рис. 3.25,а) или остающейся подкладке (рис.3.25,б).

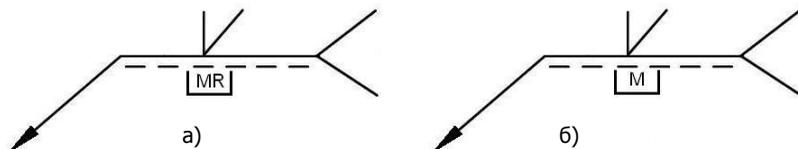


Рис. 3.25. Символы, обозначающие сварку на подкладке



Машины и автоматизация сварочного производства

В Америке, Канаде, Австралии и некоторых других странах принята структура условного обозначения сварных соединений на чертежах (рис. 3.26) в соответствии со стандартом Американского сварочного общества ANSI/AWS A2.4 – Условные обозначения для сварки и неразрушающего контроля (Symbols for Welding and Nondestructive Testing).

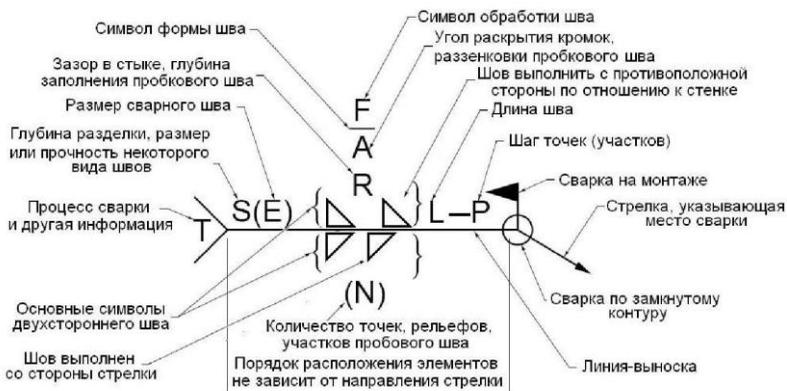


Рис. 3.26. Условное обозначение сварных соединений на чертежах в соответствии с ANSI/AWS A2.4

По структуре схема формирования обозначения близка к ISO 2553, но имеются некоторые отличия. Стрелка-выноска не имеет пунктирной линии, а для обозначения лицевой и обратной стороны сварного соединения используют следующее правило: если шов выполняют с той стороны, куда обращена стрелка, то символы сварного шва размещают под линией-выноской (рис.3.27,а); если шов выполняют с противоположной по отношению к стрелке стороны (рис.3.27,б), то над линией-выноской; символы двухсторонних швов размещают по обе стороны линии-выноска друг против друга (рис.3.27,в).

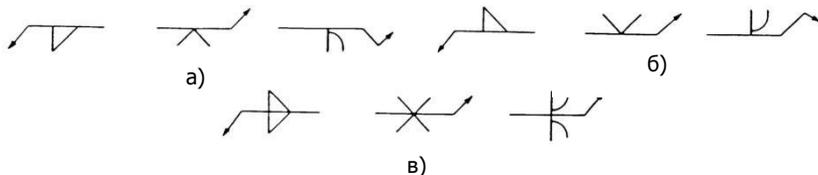


Рис. 3.27. Расположение символов на стрелке-выноске

В обозначение швов можно включать сведения о тре-



Машины и автоматизация сварочного производства

бованиях к прочности соединения (символ S на рис. 3.26), величину зазора в стыке (символ R на рис. 3.26), угол раскрытия кромок (символ A на рис. 3.26).

На рис. 3.28 приведены примеры указания размеров шва: размер катета (а), длина шва (б), длина шва и шаг швов (в), глубина разделки и эффективная толщина шва (г), зазор в стыке (д), угол раскрытия кромок (е).

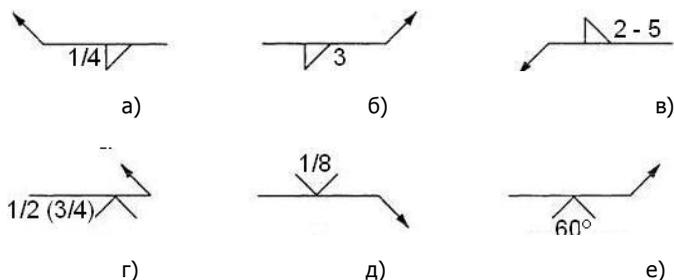


Рис. 3.28. Примеры указания размеров швов

Для соединений с угловыми швами катет шва указывают слева от символа шва, длину шва – справа от него.

Над знаком типа шва размещают знак, предписывающий необходимость обработки поверхности шва (рис.3.29) с дополнительным обозначением способа обработки: G – обработка абразивным инструментом; M – механическая обработка; C – обработка зубилом; H – проковка шва.

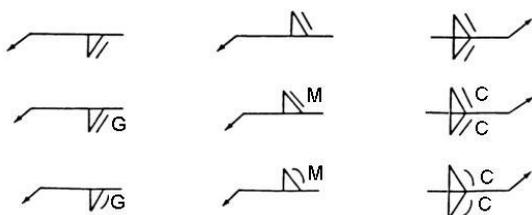


Рис. 3.29. Обозначения обработки поверхности шва

В отличие от других стандартов предусмотрен специальный знак, предписывающий выполнение одностороннего шва с полным проплавлением корня шва с обеспечением формирования обратной стороны шва без применения подкладок, т.е. на весу (рис.3.30).



Машины и автоматизация сварочного производства

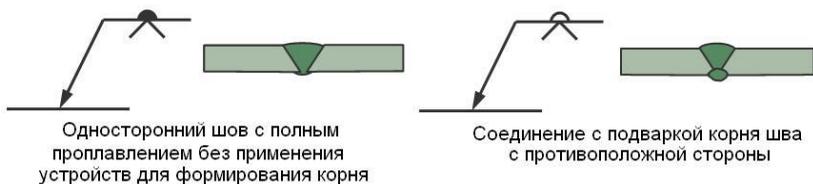


Рис. 3.30. Сварка на весу (слева) и с подваркой корня шва (справа)

Допускается использовать две или более дополнительных сплошных линий-ссылок, чтобы указать последовательность действий при выполнении сварного соединения. Первое действие указывают на линии-ссылки самой близкой к стрелке. Указание на последующие действия отмечают последовательно на других линиях-ссылках. Дополнительные линии-ссылки используют для пояснения последовательности выполнения швов, обработки поверхности, операций контроля и др. (рис. 3.31).

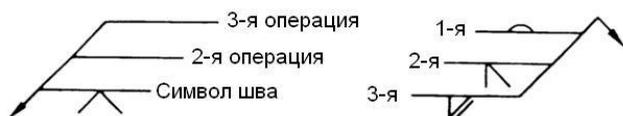
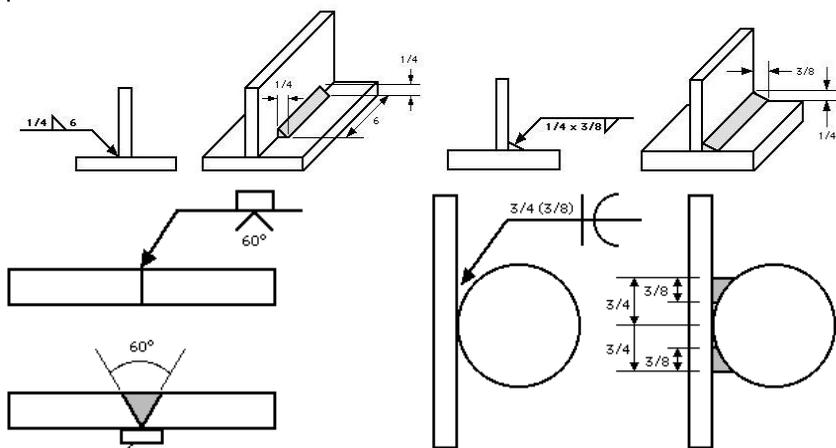


Рис. 3.31. Указания на порядок выполнения операций

Примеры обозначения сварных соединений показаны на рис.3.32.





Машины и автоматизация сварочного производства

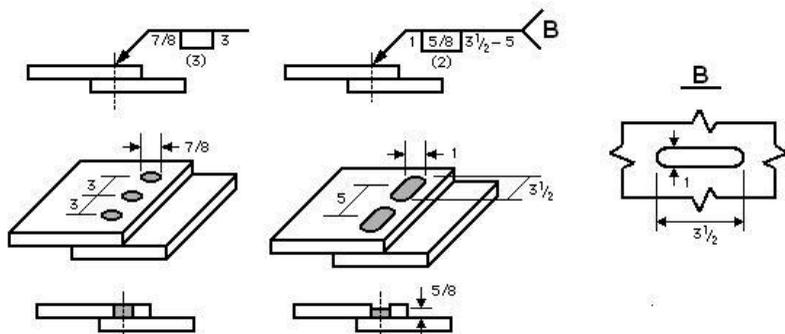


Рис. 3.32. Примеры обозначения сварных соединений в соответствии с ANSI/AWS A2.4

Необходимо обратить внимание на то, что в разветвленном конце стрелки могут быть сделаны ссылки на вид или разрез, уточняющий подготовку детали под сварку (ссылка «В» указывает на вид «В», где показаны размеры и форма отверстия под прорезной шов). Место в разветвленном конце стрелки может использоваться для дополнительной информации, связанной с выполнением сварного соединения: например, для указания вида сварочного процесса, номера сварочной спецификации (технологической карты), процедур или дополнительной информации (ссылки на вид или разрез на данной чертеже, уточняющий подготовку детали под сварку). Например, на рис. 3.32 ссылка «В» в хвостовой части условного обозначения указывает на вид «В» на чертеже, где приведены размеры и форма отверстия под прорезной шов.

При сопоставлении ГОСТ 2.312-72*, ISO 2553, ANSI/AWS A2.4 обращает на себя внимание тот факт, что последние два стандарта содержат большие возможности для детального описания требований к конструктивным особенностям сварного соединения и технологии сварки.

Для обозначения операций контроля качества сварных соединений на чертежах в ANSI/AWS A2.4 предусмотрена схема, близкая по структуре к обозначению сварных швов (рис. 3.33). Так же, как при размещении обозначений сварного соединения на линии-выноске, символы контроля качества могут размещаться на одной стороне линии или на двух, указывая с какой стороны сварного со-



Машины и автоматизация сварочного производства

единения необходимо проводить контроль. Для некоторых видов контроля важным является указание направления излучения. В этих случаях применяют специальные символы (рис. 3.33). Часто символы контроля качества и сварки совмещают на одном изображении, прикрепляя несколько параллельных полок к одной стрелке.

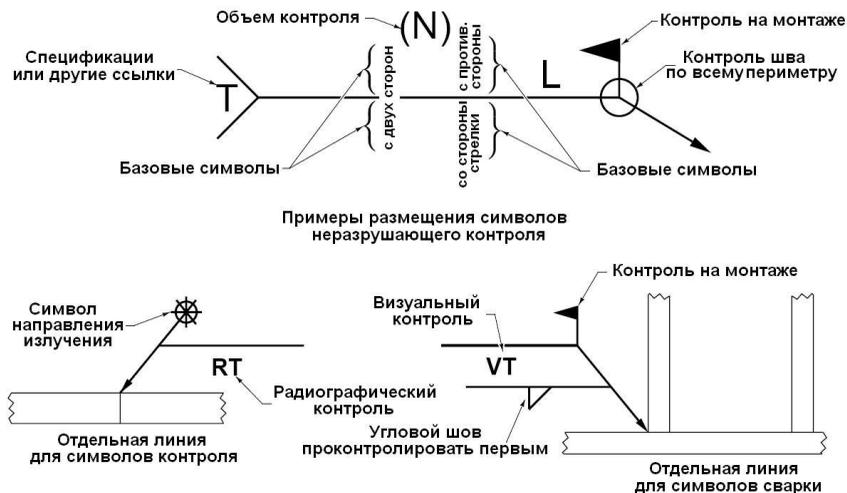


Рис. 3.33. Условные обозначения на чертежах операций неразрушающего контроля

В табл. 3.2 приведены условные обозначения (символы) различных видов неразрушающего контроля.

Таблица 3.2

Условные обозначения различных видов неразрушающего контроля (по ANSI/AWS A2.4)

Вид контроля	Условное обозначение
Контроль с применением акустической эмиссии	АЕТ
Электромагнитный контроль	ЕТ
Контроль течеисканием	ЛТ
Магнитопорошковый контроль	МТ
Нейтронная дефектоскопия	НРТ
Контроль с применением проникающей жидкости	РТ
Радиографический контроль	RT
Ультразвуковой контроль	УТ
Визуальный контроль	VT



Вопросы для самопроверки

1. Какие типы сварных соединений используются при проектировании сварных конструкций?
2. С какой целью выполняют разделку кромок при подготовке их к дуговой сварке?
3. В чем преимущества и недостатки X-образной разделки кромок по сравнению с односторонней V-образной?
4. Какие меры может принять конструктор для уменьшения объема наплавляемого материала при проектировании сварных соединений?
5. Что принимают в качестве размера углового шва при сварке без разделки кромок?
6. Как классифицируют сварные соединения в зависимости от положения шва в пространстве при сварке?
7. В каких случаях при проектировании сварных конструкций рекомендуется применять сварку с полным проплавлением верхнего элемента нахлесточного соединения?
8. В чем отличия сварных соединений, выполняемых контактной точечной, рельефной и шовной сваркой?
9. В соответствии с какими нормативными документами устанавливают размеры конструктивных элементов сварных соединения для дуговой и контактной сварки?
10. В чем состоит особенность разделки кромок под дуговую сварку двухслойных сталей?
11. Какого вида сварные соединения используют для сварки труб из термопластов?
12. Какого вида разделку кромок применяют для соединения листовых конструкций экструзионным методом?
13. Какого вида разделку кромок применяют для соединения деталей ультразвуковой сваркой?
14. Приведите примеры рационального и нерационального проектирования сварных соединений?
15. Опишите структуру условного обозначения сварных соединений металлических конструкций на чертежах, принятую в России, в странах Евросоюза, а также в США.
16. Как обозначают на чертежах требования к обработке сварного соединения после сварки в России и за рубежом?



4. РАСЧЕТ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

4.1. Основы проектирования сварных соединений

Объем металла, находящегося в зоне сварного соединения составляет доли процента от объема металла всей конструкции, однако именно прочностью этих зон во многих случаях определяется прочность конструкции, поскольку термическое и механическое воздействие сварки на металл может существенно изменять его прочностные и пластические свойства. По этой причине расчету сварных соединений, обоснованию их конфигурации и места размещения на конструкции необходимо уделять особое внимание при проектировании.

На стадии проектирования сварной конструкции должны быть решены следующие задачи:

1. Обеспечение прочности. Конструкция должна выдерживать заданную нагрузку без разрушения и появления недопустимых деформаций.

2. Обеспечение надежности. Должна быть обеспечена безотказная работа конструкция в течение требуемого периода эксплуатации с заданной вероятностью.

3. Обеспечение технологичности. Должна быть обеспечена возможность и экономичность изготовления конструкции, при условии сохранения требуемых показателей качества, прочности, надежности.

4. Выполнение специальных требований, например, к внешнему виду конструкции, точности, коррозионной стойкости, теплоустойчивости, хладостойкости, магнитным свойствам и др.

Некоторые из этих задач могут быть решены на различных этапах: при проектировании, разработке технологии, изготовлении, эксплуатации, но на этапе проектирования затраты на решение перечисленных выше задач наиболее низкие. По мере продвижения по цепочке жизненного цикла сварной конструкции цена ошибки решений, принятых при проектировании, возрастает по экспоненте.

Специалист сварочного производства, как правило, не при-



Машины и автоматизация сварочного производства

нимает непосредственное участие в расчете и проектировании сварных конструкций. Обычно ему отводят роль эксперта-консультанта при анализе принятых решений. Вместе с тем, на ряд вопросов, связанных со спецификой образования сварного соединения, влиянием термического и механического воздействия сварки на свариваемый материал, с технологическими возможностями различных процессов сварки, может ответить только специалист в области сварочного производства. Поэтому совместная работа над проектом конструктора и технолога, обладающего базовыми знаниями в области проектирования сварных конструкций, не только целесообразна, но и во многих случаях является обязательной.

Процесс проектирования проходит несколько этапов:

- определяют основные размеры элементов конструкции и их компоновку;
- определяют место расположения сварных швов и нагрузку, действующую на них;
- определяют тип сварного соединения и выбирают способ сварки;
- производят расчет размеров сварных швов, исходя из необходимости обеспечения прочности соединения при статических нагрузках;
- проводят анализ локального напряженного состояния в районе сварных соединений с целью определения необходимости произвести корректировку расчета прочности соединения при статических нагрузках;
- производят при необходимости расчет прочности сварных соединений при действии переменных нагрузок (проверка усталостной прочности), оценивают сопротивление хрупкому разрушению и сопротивление развитию разрушения, проводят расчет прочности с позиции возможного воздействия коррозионной среды;
- оценивают влияние сварочных напряжений и деформаций конструкций, возникающих в результате сварки;
- устанавливают требования к точности конструкции и качеству сварных соединений;
- проводят анализ технологических аспектов с целью обеспечения технологичности конструкции.

Возможны две стратегии проектирования сварных конструкций (рис. 4.1).

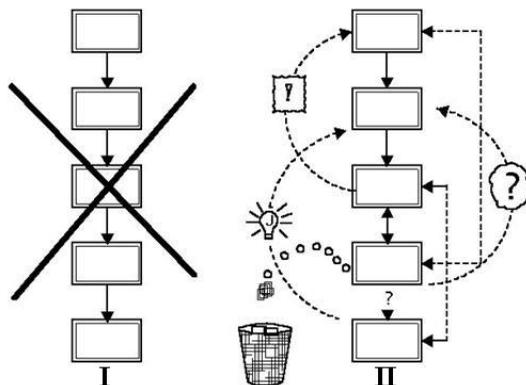


Рис. 4.1. Стратегии проектирования сварных конструкций

Стратегия I предполагает последовательное решение задач отдельных этапов проектирования без корректировки пути решения. Такую стратегию применяют редко, в основном при решении типовых задач проектирования.

Стратегия II предполагает на отдельных этапах проектирования проводить анализ достигнутых результатов и при необходимости вносить коррективы в дальнейший ход проектирования, возвратиться на предыдущие этапы, изменить принятые решения или исходные данные. При проектировании сварных конструкций такая стратегия позволяет учесть многообразие взаимно влияющих факторов и оптимизировать результат проектирования.

4.2. Обоснование необходимого запаса при расчете на прочность

Основная цель расчета прочности состоит в том, чтобы обеспечить работоспособность конструкции при заданных нагрузках и условиях эксплуатации. В общем случае некоторый параметр Q , характеризующий нагрузку, должен быть меньше параметра R , характеризующего сопротивление разрушению:

$$Q < R. \quad (4.1)$$

В практике расчета прочности при статическом нагружении в качестве параметра Q принимают величину номинальных напряжений (нормальных $\sigma_{ном}$ или касательных $\tau_{ном}$), расчет которых производится без учета неравномерности распределения напряжений по се-



Машины и автоматизация сварочного производства

чению, обусловленного концентрацией напряжений.

В качестве R принимают величину, характеризующую прочность металла в зоне предполагаемого разрушения. При этом приходится учитывать возможность случайного рассеяния параметров, характеризующих нагрузку, и прочностных характеристик сварного соединения. В связи с этим расчет должен предусматривать некоторый запас прочности (рис. 4.2).

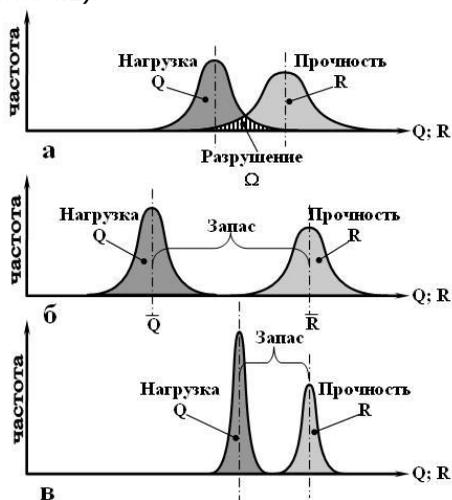


Рис. 4.2. Схема влияния рассеяния параметров нагрузки и прочности на запас прочности

Величина нагрузки Q , действующей на сварное соединение, может иметь отклонение от принятой в расчете из-за недостаточной изученности условий эксплуатации, неполного учета действующих силовых факторов, появления дополнительных нагрузок при изготовлении и монтаже конструкции и др.

Аналогичные отклонения от принятых в расчете значений могут иметь прочностные характеристики (R). Обычно эти отклонения носят случайный характер и их можно условно выразить в виде кривых Гаусса плотности распределения (относительной частоты) случайных величин Q и R .

Если в расчет принять средние значения параметров, то расстояние между средними линиями выражает запас прочности, а площадь фигуры Ω , образованной в зоне пересечения кривых (рис.4.2,а), характеризует вероятность разрушения сварного соединения. Изменяя величину запаса прочности, можно влиять на площадь фигуры Ω и надежность конструкции (рис. 4.2,б).



Машины и автоматизация сварочного производства

Следует иметь в виду, что величина запаса прочности существенно влияет на экономические показатели результатов проектирований. Чрезмерное уменьшение запаса прочности снижает надежность конструкции и в случае ее разрушения может привести к материальным потерям и дополнительным затратам на ремонт. Чрезмерное увеличение запаса приводит к увеличению массы конструкции, трудоемкости изготовления и, следовательно, к увеличению затрат на производство и эксплуатацию. Поэтому идти по пути увеличения запаса прочности экономически невыгодно. Очевидно, что необходимо стремиться к уменьшению дисперсии значений нагрузки и прочности, т.е. к уменьшению ширины области рассеяния значений (рис. 4.2,в). Это может быть достигнуто за счет более глубокого анализа условий эксплуатации конструкции, применения современных методов расчета, применения более качественных материалов, совершенствования технологии сварки и управления сварочным производством.

Запас прочности принято характеризовать относительной величиной, называемой коэффициентом запаса прочности n :

$$n = \frac{R}{\sigma}, \quad (4.2)$$

где R – нормативное сопротивление металла зоны предполагаемого разрушения (прочность); σ – напряжения, действующие в этой зоне (нагрузка). Таким образом, коэффициент запаса прочности показывает, во сколько раз показатель прочности превышает показатель нагрузки.

При назначении величины коэффициента запаса прочности учитывают: степень изученности факторов, влияющих на нагруженность сварного соединения, стабильность механических свойств основного металла и металла шва, стабильность технологического процесса, ограничения, накладываемые на массу конструкции, степень опасности последствий разрушения сварной конструкции. Например, для конструкций, изготавливаемых из материалов с исключительно стабильными механическими характеристиками с применением хорошо отлаженной стабильной технологии сварки, при условии, что нагрузки могут быть определены с высокой степенью уверенности, а малая масса конструкции является определяющим фактором, коэффициент запаса прочности принимают в пределах $n = 1,25-1,5$.

Для конструкций, изготавливаемых из материалов с недоста-



Машины и автоматизация сварочного производства

точно изученными механическими характеристиками на предприятиях, где отсутствует система управления качеством сварочного производства, при условии недостаточной информации об условиях эксплуатации, коэффициент запаса прочности может быть принят в пределах $n = 3-5$.

Требуемую величину коэффициента запаса прочности устанавливают на основании действующих нормативных документов, определяющих правила проектирования сварных конструкций конкретного вида.

На практике применяют два метода расчета: расчет по допускаемым напряжениям и расчет по предельному состоянию конструкции.

В соответствии с первым методом номинальные¹² напряжения, действующие в сварном соединении конструкции, не должны превышать некоторого установленного предельного значения, называемого «допускаемые напряжения». Соответствующий символ заключают в квадратные скобки.

$$\left\{ \begin{array}{c} \sigma \\ \tau \end{array} \right\} \leq \varphi_w \left\{ \begin{array}{c} \sigma \\ \tau \end{array} \right\}, \quad (4.3)$$

где φ_w – коэффициент прочности сварного шва; σ и τ – номинальные нормальные или касательные напряжения, действующие в сечении сварного соединения, $[\sigma]$ и $[\tau]$ – допускаемые напряжения.

Расчет по предельному состоянию конструкции предполагает, что действующая нагрузка не должна вызывать наступление предельного состояния.

Различают два предельных состояния. К первому предельному состоянию (предельное состояние I) относят такие состояния конструкции, при которых она перестает удовлетворять заданным эксплуатационным требованиям или требованиям производства работ в результате вязкого, хрупкого, усталостного разрушения или потери устойчивости.

Второму предельному состоянию (предельное состояние II) соответствует появление недопустимых перемещений, прогибов, вибраций и др., нарушающих пригодность конструкции к нормальной эксплуатации. Например, большой упругий прогиб подкрановой балки под действием груза может затруднить перемещение тележки с

¹² При расчете по номинальным напряжениям концентрация напряжений не учитывается.



Машины и автоматизация сварочного производства

грузом и означает наступление предельного состояния, даже в том случае, когда уровень напряжений не превышает допускаемый.

Для расчета сварных соединений по предельному состоянию, как правило, рассматривают наступление I предельного состояния. Расчет по предельному состоянию II, как правило, используют при расчете конструкции в целом.

Расчет сварных соединений по допускаемым напряжениям наиболее часто применяют в тех случаях, когда конструктивные элементы и условия их эксплуатации не отличаются большим разнообразием, например, при расчете сварных машиностроительных конструкций, сосудов, работающих под давлением, и др. Величину допускаемых напряжений ($[\sigma]$, $[\tau]$) устанавливают в соответствии с данными, приведенными в нормативных документах в виде таблиц, или расчетным путем в зависимости от нормативных характеристик прочности при заданных условиях эксплуатации:

$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{R_m}{n_m}; \frac{R_{02}}{n_{02}}; \frac{R_{mt}}{n_{mt}} \right\}, \quad (4.4)$$

где R_m , R_{02} , R_{mt} – нормативные характеристики прочности соответственно по временному сопротивлению разрыву, пределу текучести и пределу длительной прочности при заданной температуре эксплуатации; n_m , n_{02} , n_{mt} – коэффициенты запаса прочности для соответствующей нормативной характеристики прочности. Для сварных стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды¹³ из углеродистых и теплоустойчивых сталей принимают: $n_m=2,4$, $n_{02}=1,5$, $n_{mt}=1,5$. Из полученных по (4.4) значений $[\sigma]$ принимают наименьшее.

Величину коэффициент прочности сварного шва φ_w принимают в зависимости от способа сварки, метода контроля качества сварного соединения и относительного объема контролируемых участков шва. Например, для сварных стыковых соединений стационарных котлов, выполненных с полным проваром, нормативный документ РД 10-249-98 предписывает:

- при 100% контроле всех швов с применением радиографического или ультразвукового методов $\varphi_w=1,0$;
- при выборочном контроле объемом не менее 10% $\varphi_w=0,8$;
- при отсутствии контроля или при выборочном контроле объемом менее 10% $\varphi_w=0,7$.

¹³ РД 10-249-98. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды. – СПб.: Изд-во ДЕАН, 2002. – 384с.



Машины и автоматизация сварочного производства

При расчете угловых и тавровых соединений при 100% контроле принимают $\varphi_w \leq 0,8$; при выборочном контроле или отсутствии контроля – $\varphi_w \leq 0,6$.

Стандарт Американского общества инженеров механиков для сварных соединений котлов и сосудов, работающих под давлением¹⁴, предписывает значения коэффициента прочности сварного шва, приведенные в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Значение коэффициента прочности сварного шва φ_w
в соответствии с ASME Section VIII

Вид сварного соединения	Значение коэффициента φ_w		
	100%	Выборочный	Без контроля
Двустороннее стыковое	1,00	0,85	0,70
Одностороннее на подкладке	0,90	0,80	0,65
Одностороннее без подкладки	–	–	0,60

Из приведенных выше примеров можно заключить, что выбор значения φ_w зависит от степени уверенности в возможности принятой технологии обеспечить прочность сварного соединения на уровне прочности основного металла: чем она выше, тем ближе значение φ_w к 1,0.

Значение коэффициента прочности сварного шва существенно зависит от склонности свариваемого материала к разупрочнению под воздействием термического цикла сварки, например, для соединений алюминиевых сплавов, упрочненных пластическим деформированием, φ_w может быть значительно меньше 1,0.

Преимуществом расчета по допускаемым напряжениям является относительная простота этого метода. К недостаткам следует отнести слабую дифференциацию особенностей условий эксплуатации различных конструкций. Именно по этой причине фактические значения номинальных допускаемых напряжений устанавливают отдельно для различных типов конструкций. В некоторых случаях расчет по допускаемым напряжениям приводит к излишнему расходу металла и избыточному весу конструкции.

В практике проектирования сварных строительных конструкций, которые отличаются большим разнообразием конструктивных форм и условий эксплуатации, в Советском Союзе был разработан

¹⁴ ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII, Division 1, Rules for Construction of Pressure Vessels, The American Society of Mechanical Engineers. – New York, 2001 Edition, 2002 Addenda.



Машины и автоматизация сварочного производства

метод расчета по предельному состоянию. Этот метод в настоящее время широко применяется не только в России, но и в других промышленно развитых странах мира.

Расчет по предельным состояниям имеет целью обеспечить надежность здания или сооружения в течение всего его срока службы, а также при производстве работ.

Условия обеспечения надежности заключается в том, чтобы расчетные значения нагрузок или ими вызванных усилий, напряжений, деформаций, перемещений, раскрытий трещин не превышали соответствующих им предельных значений, устанавливаемых нормами проектирования конструкций или оснований.

При расчете по первому предельному состоянию наибольшее, возможное за время эксплуатации, усилие Q , принятое в расчет, не должно превышать соответствующей уровень наименьшей предельной несущей способности R :

$$Q \leq R. \quad (4.5)$$

Под величиной Q понимают номинальные напряжения, возникающие в результате воздействия продольной или поперечной силы, изгибающего или крутящего момента или сочетания нагрузок.

В общем виде основное уравнение расчета прочности по первому предельному состоянию в том случае, когда местная пластическая деформация не допускается, имеет следующее выражение (в скобках даны ориентировочные значения коэффициентов, входящих в выражение (4.6) для строительных конструкций):

$$\Psi \gamma_f \gamma_n \frac{P}{F} \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_m} R_{yn} \quad , \quad (4.6)$$

где Ψ – коэффициент сочетания нагрузок ($\Psi \approx 0,6-1,0$); γ_f – коэффициент надежности по нагрузке ($\gamma_f \approx 0,9-1,6$); γ_c – коэффициент условий работы ($\gamma_c \approx 0,7-1,2$); γ_m – коэффициент надежности по материалу ($\gamma_m \approx 1,025-1,35$); γ_n – коэффициент надежности по ответственности ($\gamma_n \approx 0,8-1,2$); P – величина растягивающей или сжимающей нагрузки; F – площадь поперечного сечения; R_{yn} – предел текучести материала, принимаемый равным значению предела текучести σ_{02} по государственным стандартам или техническим условиям на материал.

Коэффициент надежности по нагрузке учитывает возможное отклонение нагрузок в неблагоприятную (большую или меньшую) сторону от их нормативных значений вследствие изменчивости нагрузок или отступлений от условий нормальной эксплуатации. Коэф-



Машины и автоматизация сварочного производства

коэффициент сочетания нагрузок учитывает уменьшение вероятности одновременного превышения несколькими нагрузками их расчетных значений по сравнению с вероятностью превышения одной нагрузкой ее расчетного значения. Эти коэффициенты рекомендует вводить для обеспечения надежности строительных конструкций ГОСТ 27751-88 с изменениями №1 1999 г. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету.

Можно видеть, что левая часть уравнения (4.6) представляет собой величину номинальных напряжений $\sigma_{ном}$ в сечении конструкции, умноженную на коэффициенты ψ , γ_f и γ_n , что, в отличие от рассмотренного выше метода расчета по допускаемым напряжениям, позволяет более полно учитывать надежность сведений о действующих на конструкцию нагрузках при определении $\sigma_{ном}$.

Правая часть уравнения (4.6), представляет собой величину допускаемых напряжений, получаемую путем деления гарантированного значения предела текучести материала на коэффициент запаса прочности:

$$n_{02} = \frac{\gamma_m}{\gamma_c} . \quad (4.7)$$

Сопоставляя выражения (4.4) и (4.6), можно видеть, что расчет по предельному состоянию отдельно учитывает запас прочности, необходимый для компенсации рисков, связанных с возможным отклонением нагрузки от проектной величины (коэффициенты ψ , γ_f и γ_n), и запас прочности, необходимый для компенсации рисков, связанных с возможным отклонением прочностных характеристик материала.

Благодаря этому метод расчета по предельному состоянию позволяет дифференцированно подойти к расчету конструкций, учесть особенности условий эксплуатации конструкции и стабильность свойств конструкционного материала. Все это способствует более эффективному использованию конструкционного материала за счет обоснованного назначения запаса прочности.

Подводя итог рассмотрению вопроса о запасе прочности при расчете конструкций необходимо обратить внимание на то, что в настоящее время не существует строгого обоснования выбора величины коэффициента запаса прочности. В основе рекомендаций тех или иных конкретных значений коэффициентов лежит опыт проектирования и эксплуатации конструкций различного назначения, а также опыт, накопленный при анализе аварий и повреждений. Этот опыт



Машины и автоматизация сварочного производства

отражают нормативные документы, действующие в различных отраслях экономики. Поэтому при проектировании и расчете сварных конструкций необходимо использовать нормативные документы той отрасли, для которой предназначена данная конструкция.

Несомненно, важную роль играет опыт, накопленный в мировой практике и, следовательно, при разработке отраслевых нормативных документов необходимо опираться на международные стандарты и рекомендации:

- prEN 1993-1-8: 2003(E) – Проектирование стальных конструкций. Части 1 – 8. Проектирование соединений.
- ISO 16528-1:2007 – Котлы и сосуды, работающие под давлением. Часть 1. Нормы проектирования.
- ASME BPVC Sections – 2007 Boiler and Pressure Vessel Code – Коды по котлам и сосудам высокого давления.
- EN 13455-3 Unfired pressure vessels. Part 3 – Бестопочные сосуды, работающие под давлением.
- AWS D1.1/D1.1M-2006. Structural welding code: Steel – Код Американского сварочного общества. Сварка строительных конструкций. Стали.
- DIN 18800-1 Structural steelwork. Design and construction. – Стальные конструкции. Расчет и проектирование.

4.3. Типы сварных соединений

Тип сварного соединения определяют взаимным расположением свариваемых элементов и формой подготовки (разделки) их кромок под сварку. В зависимости от расположения соединяемых деталей различают четыре основных типа сварных соединений: стыковые (рис.4.3,а), нахлесточные (рис.4.3,б), тавровые (рис.4.3,в) и угловые (рис.4.3,г).

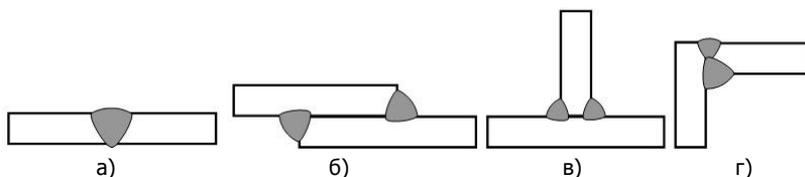


Рис. 4.3. Основные типы сварных соединений



Машины и автоматизация сварочного производства

Соединения могут быть выполнены со сплошным швом по длине или с прерывистым, с полным проплавлением свариваемых кромок или с частичным (соединения с конструктивным непроваром).

Нахлесточные соединения выполняют:

- угловыми швами (рис.4.3,б);
- проплавными, когда нахлесточное соединение образуется путем сквозного проплавления одной из деталей (рис.4.4,а);
- пробковыми, когда в одной из деталей перед сваркой выполняют сквозное отверстие и производят сварку через отверстие с полным заполнением его (рис.4.4,б);
- прорезными, когда в одной из деталей перед сваркой выполняют сквозное отверстие и приваривают ее к другой детали угловым швом через отверстие (рис.4.4,в).

Основным нормативным документом, использующим расчет сварных соединений по предельному состоянию при проектировании стальных строительных конструкций, является СНиП II-23-81*. Стальные конструкции СНиП – Строительные нормы и правила.

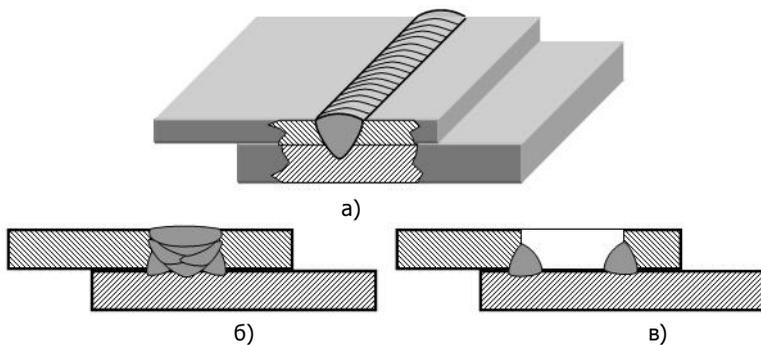


Рис. 4.4. Нахлесточные соединения с проплавным (а), пробковым (б) и прорезным (в) швом

В соответствии с этим документом уравнение прочности можно записать по аналогии с уравнением (4.3) в следующем виде:



Машины и автоматизация сварочного производства

$$\left\{ \begin{matrix} \sigma \\ \tau \end{matrix} \right\} \leq \gamma_c \left\{ \begin{matrix} R_{wy} \\ R_{wu} \\ R_{ws} \\ R_{wf} \\ R_{wz} \end{matrix} \right\}, \tag{4.8}$$

где символом R_w обозначается расчетное сопротивление сварного соединения, второй символ после w обозначает следующее: y – расчет по пределу текучести; u – расчет по пределу прочности (временному сопротивлению); s – расчет на срез; f – расчет при разрушении по наплавленному металлу углового шва; z – расчет при разрушении по металлу зоны сплавления углового шва.

Связь значений расчетного сопротивления различных зон сварного соединения с другими прочностными характеристиками металла представлена в табл. 4.2.

Таблица 4.2
Расчетное сопротивление сварного соединения

Тип сварного соединения	Напряженное состояние	Условие расчета	Расчетные сопротивления сварных соединений
Стыковые соединения	Сжатие. Растяжение и изгиб при автоматической, полуавтоматической или ручной сварке с физическим контролем качества швов	По пределу текучести	$R_{wy} = R_y = \frac{R_{yn}}{\gamma_m}$
		По временному сопротивлению	$R_{wu} = R_u$
	Растяжение и изгиб при автоматической, полуавтоматической или ручной сварке	По пределу текучести	$R_{wy} = 0,85R_y$
	Сдвиг		$R_{ws} = 0,58R_y$
Соединения с угловыми швами	Срез (условный)	По металлу шва	$R_{wf} = 0,55 \frac{R_{wm}}{\gamma_{wm}}$
		По металлу границы сплавления	$R_{wz} = 0,45R_{un}$



Примечания: 1. Для швов, выполняемых ручной дуговой сваркой, значения $R_{wпл}$ рекомендуется принимать равными значениям временного сопротивления разрыву металла шва, указанным в ГОСТ 9467–75*.

2. Для швов, выполняемых автоматической или механизированной сваркой, значение $R_{wпл}$ рекомендуется принимать по табл. 4* СНиП II-23-81* (с изм. №1 1999г).

3. Значения коэффициента надежности по материалу шва γ_{wm} рекомендуется принимать равными: 1,25 – при значениях $R_{wпл}$ не более 490 МПа; 1,35 – при значениях $R_{wпл}$ 590 МПа и более.

4. R_y и R_u – расчетные сопротивления для основного металла, соответственно по пределу текучести и по временному сопротивлению, R_{yn} – нормативное значение временного сопротивления основного металла, R_{yn} – нормативное значение предела текучести материала в соответствие со стандартом или ТУ.

5. γ_m – коэффициент надежности по основному металлу.

В общем случае расчет сварных соединений на прочность при статических нагрузках сводится к сопоставлению максимальной величины номинальных напряжений в расчетном сечении с величиной расчетного сопротивления для данного сечения (или величиной допускаемых напряжений).

4.4. Расчет сварных стыковых соединений

Расчет сварных стыковых соединений на центральное растяжение или сжатие следует производить по формуле:

$$\sigma_{ном} = \frac{N}{t l_w} \leq R_{wy} \gamma_c \text{ или } \frac{N}{t l_w} \leq \varphi_w \bar{\sigma} \quad (4.9)$$

где t – наименьшая толщина металла соединяемых элементов, утолщение шва в расчет не принимают; l_w – расчетная длина шва, равная полной его длине, уменьшенной на $2t$, или полной его длине в случае вывода концов шва за пределы стыка на выводные планки; N – величина нагрузки, действующей на сварное соединение.

Образование сварного соединения сопровождается появлением структурной и механической неоднородности. Прочность зоны сплавления или металла шва может отличаться от прочности основного металла, в околосшовной зоне может наблюдаться разупрочнение. Поэтому иногда рекомендуется проводить проверочные расчеты прочности в предположении возможности разрушения в различных зонах. Такую проверку рекомендуется проводить для сварных



Машины и автоматизация сварочного производства

соединений алюминиевых сплавов, упрочненных пластическим деформированием, или в тех случаях, когда нет уверенности, что прочность наплавленного металла шва окажется не ниже прочности основного металла. Вместе с тем следует иметь в виду, что повысить прочность сварного стыкового соединения за счет применения более прочного присадочного металла не представляется возможным.

В тех случаях, когда через шов сварного стыкового соединения не предполагают передавать большие нагрузки, равнопрочность сварного соединения не требуется. В этих случаях применяют сварку с неполным проплавлением кромок или сварку прерывистыми швами (рис.4.5).

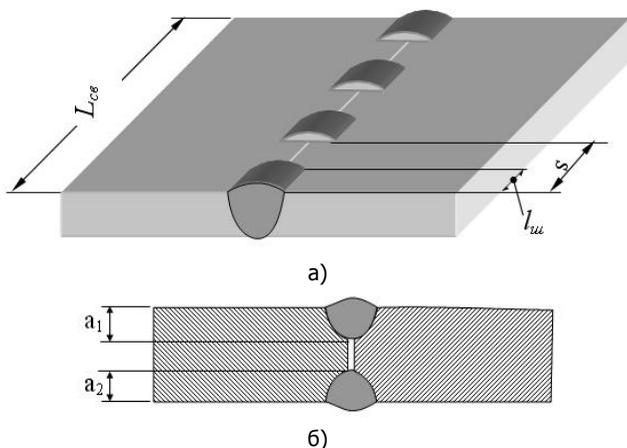


Рис. 4.5. Сварные стыковые соединения с прерывистым швом (а) и с неполным проплавлением кромок (б)

Прочность таких соединений рассчитывают исходя из действительного размера сечения шва без учета утолщения шва.

Для прерывистых швов:

$$\sigma_{ном} = \frac{N}{tL_{ce}} \cdot \frac{s}{l_{ш}} \leq \varphi_w \left[\sigma \right] \quad (4.10)$$

Для швов с неполным проплавлением:

$$\sigma_{ном} = \frac{N}{(a_1 + a_2) l_{cd}} \leq \varphi_w \left[\sigma \right] \quad (4.11)$$

Следует иметь в виду, что в сварных соединениях с непол-



Машины и автоматизация сварочного производства

ным проплавлением кромок или с прерывистыми швами под действием нагрузки создается высокая концентрация напряжений. Такие соединения не рекомендуется применять для конструкций из недостаточно пластичных материалов или работающих при переменных нагрузках.

По аналогии с рассмотренным выше производят расчет при действии других силовых факторов, например, при действии изгибающего, крутящего момента или перерезывающей силы.

4.5. Расчет сварных соединений с угловыми швами

Расчетное сечение. Практика проектирования сварных конструкций свидетельствует о том, что именно соединения с угловыми швами приходится наиболее часто рассчитывать на прочность. Это объясняется несколькими причинами. Во-первых, этот вид соединений является преобладающий во многих отраслях производства (например, в строительных конструкция объем сварных соединений с угловыми швами достигает 90 %).

Во-вторых, большая часть таких соединений передает нагрузку, что требует обоснования их размеров, поскольку завышение размера катета шва приводит к существенному увеличению объема наплавленного металла, трудоемкости и энергетических затрат при производстве. Например, завышение катета шва 1мм приводит к увеличению массы наплавленного металла в швах с $K = 10\text{мм}$ приблизительно на 20 %, а в швах с $K = 6\text{мм}$ – более чем на 35 %.

В зависимости от размеров и механических свойств основного металла и металла угловых швов имеется несколько зон, определяющих прочность сварного соединения (рис.4.6). Если тавровое соединение выполнено с полным проплавлением, а прочность металла шва не уступает прочности основного металла, то наиболее вероятной зоной разрушения является зона 1.

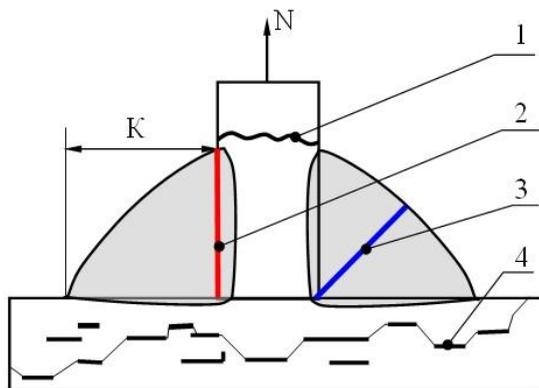


Рис. 4.6. Возможные зоны разрушения в соединениях с угловыми швами

При статических нагрузках разрушение сварных соединений с угловыми швами наиболее часто происходит по зоне 3 или зоне 2. Зона 2 служит источником разрушения в том случае, когда прочность металла шва превышает прочность основного металла.

Разрушение по зоне 4 наблюдается в тех случаях, когда прочность основного металла в направлении толщины стенки имеет низкую величину или когда в зону сварки попадает дефект расслоение металла. Как правило, эти проблемы возникают при толщине металла более 20 мм и высоком содержании в нем вредных примесей, особенно серы.

Расчет прочности шва в зоне 2 и зоне 3. В обычных случаях расчет сварных соединений выполняют из предположения, что разрушение может произойти либо по зоне 3, либо по зоне 2. Независимо от направления действующей силы по отношению к шву принято считать, что разрушение угловых швов происходит в результате действия касательных напряжений.

Основным расчетным параметром является размер катета шва K , который определяют как катет вписанного равнобедренного треугольника в контур поперечного шва (рис.4.7). Высота расчетного сечения углового шва зависит от катета шва, зоны предполагаемого разрушения и глубины проплавления.

При ручной дуговой сварке, когда глубина проплавления основного металла невелика (рис.4.8,а), высоту расчетного сечения принимают равной катету шва $h=K$ при расчете прочности по зоне 2, и $h = 0,7K$ при расчете по зоне 3. Выпуклость шва при расчете не учитывается.

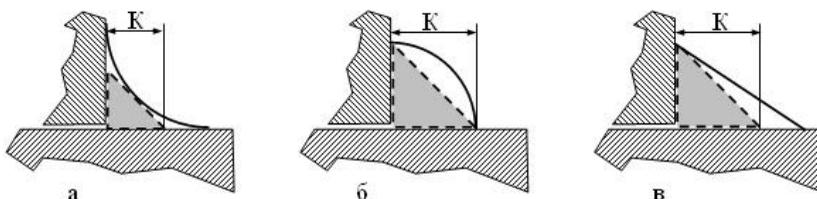


Рис. 4.7. Выделение расчетного значения катета шва

При сварке с глубоким проплавлением, например, механизированной в защитных газах или автоматической под флюсом, высота расчетного сечения шва увеличивается (рис.4.8,б).

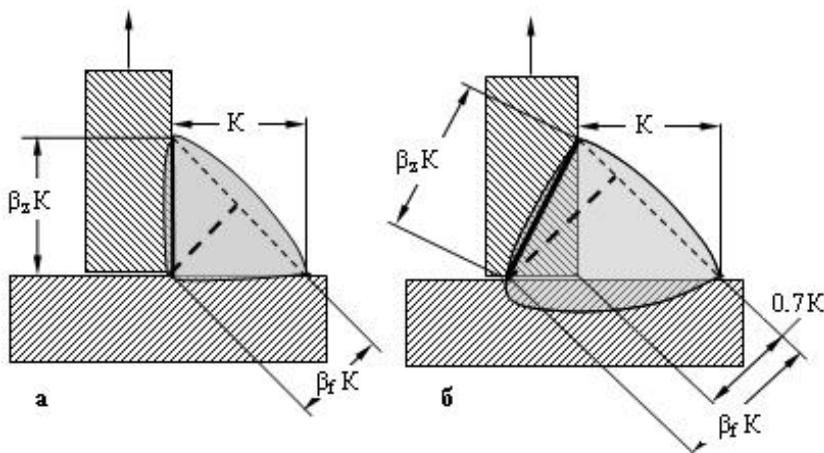


Рис. 4.8. Расчетная высота углового шва

В общем случае высоту расчетного сечения определяют как $h = \beta_z K$ ($\beta_z = 1-1,15$) для зоны 2 и $h = \beta_f K$ ($\beta_f = 0,7-1,1$) для зоны 3. Значения коэффициентов β_z и β_f установлены на основании статистической обработки многочисленных экспериментов, проведенных в ИЭС им. Е.О. Патона.

СНиП II-23-81* рекомендует при расчете прочности сварных соединений принимать в зависимости от способа сварки и положения шва значения β_z и β_f в соответствии с табл. 4.3.



Таблица 4.3

Вид сварки при диаметре сварочной проволоки d , мм	Положение шва	Коэффициент	Значения коэффициентов β_f и β_z при катетах швов, мм			
			3-8	-12	4-16	18 и более
1	2	3				7
Автоматическая при $d = 3 - 5$	В лодочку	β_f	1,1			0,7
		β_z	1,15			1
	Нижнее	β_f	1,1	0,9		0,7
		β_z	1,15	1,05		1

Окончание табл. 4.3

1	2	3	4	5	6	7
Автоматическая и механизированная при $d = 1,4 - 2$	В лодочку	β_f	0,9		0,8	0,7
		β_z	1,05		1	
	Нижнее, горизонтальное, вертикальное	β_f	0,9	0,8	0,7	
		β_z	1,05	1		
Ручная; механизированная проволокой сплошного сечения при $d < 1,4$ или порошковой проволокой	В лодочку, нижнее, горизонтальное, вертикальное, потолочное	β_f	0,7			
		β_z	1			

Следует отметить, что в тех случаях, когда способ сварки и положение шва в пространстве при выполнении сварки влияет на расчетную высоту углового шва, в технических требованиях на чертежах должна быть сделана соответствующая отметка. Если при проектировании неизвестно, в каком положении будет осуществлена сварка, необходимо принимать значения $\beta_f = 0,7$ и $\beta_z = 1,0$, такие же значения коэффициентов необходимо применять при расчете сварных соединений из сталей с пределом текучести свыше 530МПа, независимо от вида сварки, положения шва и диаметра сварочной проволоки.

При сварке с использованием технологических приемов, направленных на повышение производительности наплавки, которые сопровождаются снижением глубины проплавления (например, сварка при удлиненном вылете электрода, при прямой полярности постоянного тока, с применением дополнительного присадочного материала и т.п.), значения коэффициентов рекомендуется принимать $\beta_f = 0,7$ и $\beta_z = 1$.

Расчет сварных соединений с угловыми швами проводят, как минимум, по двум сечениям:

- по металлу шва



Машины и автоматизация сварочного производства

$$\tau_{ном} = \frac{N}{\beta_f K l_w} \leq R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c; \quad (4.12)$$

– по металлу границы сплавления

$$\tau_{ном} = \frac{N}{\beta_z K l_w} \leq R_{wz} \gamma_{wz} \gamma_c, \quad (4.13)$$

где l_w – расчетная длина шва, принимаемая меньше его полной длины на 10 мм; γ_{wf} и γ_{wz} – коэффициенты условий работы шва, равные 1 во всех случаях, кроме конструкций, возводимых в климатических районах¹⁵ I₁, I₂, II₂ и II₃, для которых $\gamma_{wf} = 0,85$ для металла шва с нормативным сопротивлением $R_{wun} = 410$ МПа и $\gamma_{wz} = 0,85$ для всех сталей.

При проектировании соединений с угловыми швами необходимо выбирать сварочные материалы так, чтобы прочность соединения по зоне 2 и зоне 3 была приблизительно одинаковой. Из сопоставления (4.12) и (4.13) можно заключить, что этому требованию удовлетворяют сварочные материалы с расчетным сопротивлением металла шва в соответствии с уравнением:

$$R_{wz} < R_{wf} \leq R_{wx} \frac{\beta_z}{\beta_f}. \quad (4.14)$$

3.6. Соединения, выполненные под углом

В некоторых случаях взаимное расположение деталей в тавровом соединении отличается от 90°. На рис. 4.9 показано сечение таврового соединения, нагруженного силой, действующей вдоль шва.

При расположении деталей таврового соединения под острым или тупым углом расчетная высота шва зависит не только от катета шва, но и от угла наклона φ одной детали по отношению к другой (рис.4.9,а).

$$h = K \cos \frac{\varphi}{2}. \quad (4.15)$$

Расчет таких соединений производят в два этапа: вначале вычисляют среднее значение высоты расчетного сечения, затем оп-

¹⁵ Климатические районы устанавливаются в соответствии с ГОСТ 16350-80. I₁ – очень холодный; I₂ – холодный; II₂ – арктический восточный; II₃ – арктический западный.



Машины и автоматизация сварочного производства

ределяют размер катета швов с каждой стороны таврового соединения из условия минимизации суммы площадей сечения швов, т.е. минимизации объема наплавленного металла.

Используя обозначения рис.4.9, произведем расчет среднего значения высоты шва $h_{cp}=0,5(h_1+h_2)$:

$$h_{cp} \geq \frac{N}{2l_{св} R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c} \quad (4.16)$$

Далее устанавливают значение высоты шва для каждого шва таврового соединения. На рис 4.9,а видно, что при равенстве $h_1=h_2$ катет шва со стороны тупого угла K_2 больше, чем со стороны острого угла K_1 , что ведет к неоптимальному распределению наплавленного металла.

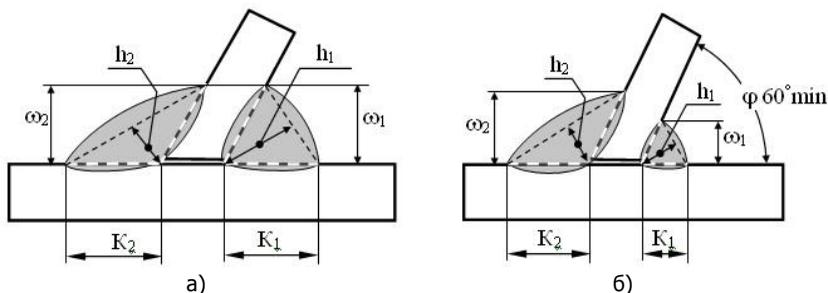


Рис. 4.9. Соединение, выполненное под углом: а – $K_1=K_2$; б – $h_1=h_2$

На основании решения оптимизационной задачи можно показать, что наименьший объем наплавленного металла соответствует следующему соотношению значений h_1 и h_2 :

$$h_1 = \frac{h_{cp}}{1 + tg^2 \frac{\varphi_1}{2}}; \quad h_2 = \frac{h_{cp}}{1 + tg^2 \frac{\varphi_2}{2}} \quad (4.17)$$

Далее, используя выражение (4.15), определяют размер катета шва, так как на производстве более удобно контролировать значение K , чем h .

4.7. Расчет соединений с учетом направления действия силы

Прочность металла на срез составляет около 60 % от прочности на растяжение. Поэтому, когда в сварном соединении сила на-



Машины и автоматизация сварочного производства

правлена перпендикулярно плоскости разрушения, прочность сварного соединения выше, чем в том случае, когда сила направлена вдоль плоскости разрушения и металл шва работает на срез. Это можно проиллюстрировать на рис.4.10. Будем считать, что сварка выполнена без глубокого проплавления и плоскость предполагаемого разрушения (расчетная площадь шва) совпадает с биссекторной плоскостью углового шва. Если действующая сила N направлена перпендикулярно этой плоскости, то действуют нормальные напряжения и прочность соединения определяется прочностью металла шва на разрыв ($R_{wy} = R_y$). По мере того как изменяется угол наклона силы N в расчетной плоскости, возрастает величина составляющей касательных напряжений, при угле $\alpha=135^\circ$ в зоне разрушения будут действовать только касательные напряжения и в качестве расчетного сопротивления металла шва необходимо принимать $R_{ws} = 0,58R_y$ (см. табл. 4.2). Как можно видеть, с изменением направления действующих сил прочность соединений с угловыми швами может изменяться, а упрощенный расчет, учитывающий только касательные напряжения, может приводить к излишнему расходу наплавленного металла.

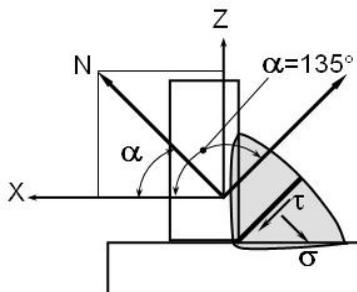


Рис.4.10. Изменение напряженного состояния в зависимости от направления действующей силы

Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные в МВТУ им. Н.Э. Баумана, позволили установить характер изменения несущей способности углового шва в зависимости от угла наклона действующей силы по отношению к плоскости разрушения (рис. 4.11) и предложить корректирующий множитель, учитывающий направление действия силы:

$$[\sigma] = C [\sigma]_{\alpha=135^\circ}; \quad C = \frac{C_\alpha}{\sqrt{\sin^2 \gamma + C_\alpha^2 \cos^2 \gamma}}, \quad (4.18)$$

где $[\sigma]_{\alpha=135^\circ}$ – допускаемое напряжение (расчетное сопротивление).

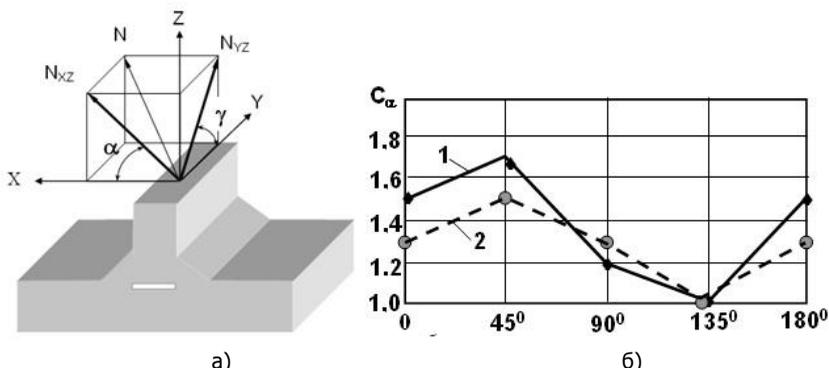


Рис. 4.11. Расчет влияния направления силы на прочность углового шва: 1 – по методу МВТУ; 2 – по формуле (3.19)

Аналогичные работы были получены в Великобритании¹⁶, результатом которых было выдвинуто предложение ввести в расчетные формулы корректирующий коэффициент, назовем его V_{α} по аналогии с C_α :

$$V_\theta = \left(+0,5 \sin^{1,5} \theta \right), \quad (4.19)$$

где с учетом принятого на рис. 4.10 и 4.11 направление отсчета угла $\theta = (\alpha - 135^\circ)$.

Можно видеть, что оба метода отражают одинаковую тенденцию изменения корректирующего множителя, но выражение (4.19) дает более консервативный результат, о чем говорят сами авторы.

Корректирующий множитель по формуле (4.19) используется в некоторых нормативных документах по расчету сварных металлоконструкций¹⁷. В качестве примера рассмотрим результаты расчета нахлесточных сварных соединений с фланговыми¹⁸ (рис.4.12,а) и ло-

¹⁶ Butler, L. and Kulak, G. Strength of Fillet Welds as a function of Direction of Load // "Welding Journal, Vol. 50, No. 5, 1971, The American Welding Society Research Supplement, pp. 231-s.

¹⁷ BS 5950-1:2000 Британский строительный стандарт. Стандарт Американского сварочного общества ANSI/AWS D1.1-98 – Сварные строительные конструкции. Сталь. (ANSI/AWS D1.1-98 Structural Welding Code: Steel. AWS, 1998, pp. 8, 350-351).

¹⁸ Фланговыми называют сварные швы, продольная ось которых направлена вдоль действия силы.



Машины и автоматизация сварочного производства

бовыми¹⁹ (рис.4.12,а) угловыми швами по стандарту, рекомендуемому ANSI/AWS D1.1-98.

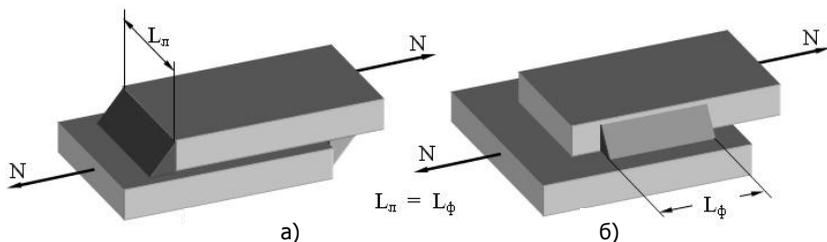


Рис. 4.12. Лобовой (а) и фланговый (б) швы

Будем исходить из равенства длин швов. Швы выполнены ручной дуговой сваркой электродами, обеспечивающими гарантированное значение предела текучести наплавленного металла на уровне $F_{EXX} = 480$ МПа. В соответствии с нормами ANSI/AWS D1.1-98 расчетное сопротивление металла шва при заданном направлении действующей силы определяем по формуле:

$$F_V = 0,30 F_{EXX} (1,0 + 0,50 \sin^{1,5}\theta) . \quad (4.20)$$

Для лобового шва $\theta = 90^\circ$, для флангового шва $\theta = 0^\circ$, длина шва 0,1 м, нагрузка $N = 180$ Кн.

Для двух лобовых швов:

- сопротивление металла шва $(F_V)_л = 0.30 \cdot 480 \cdot 1,5 = 216$ МПа;
- катет шва

$$K_л = \frac{180(Кн)}{216(МПа) \cdot 2(шва) \cdot 0,1м(длина) \cdot 0,707} = 0,00589м(5,89мм),$$

принимаем $K_л = 6мм$.

Для двух фланговых швов:

- сопротивление металла шва $(F_V)_л = 0.30 \cdot 480 \cdot 1,0 = 144$ МПа;
- катет шва

$$K_л = \frac{180(Кн)}{144(МПа) \cdot 2(шва) \cdot 0,1м(длина) \cdot 0,707} = 0,0088м(8,8мм),$$

¹⁹ Лобовыми называют сварные швы, продольная ось которых направлена в поперечном направлении к направлению действия силы.



Машины и автоматизация сварочного производства

принимаем $K_d = 10 \text{ мм}$.

Как видно, расчет нахлесточного соединения с лобовыми швами при использовании норм ANSI/AWS D1.1-98 позволяет уменьшить объем наплавленного металла в 2,8 раза.

При проектировании нахлесточных соединений следует учитывать тот факт, что лобовые швы имеют значительно меньшую податливость, чем фланговые. Вследствие этого в комбинированных соединениях, когда накладка приварена одновременно лобовыми и фланговыми швами, нагрузка распределяется неравномерно и лобовые швы оказываются более нагруженными. В таких соединениях рассчитывать на более высокую прочность лобовых швов рискованно, лучше исходить из предположения, что они так же, как и фланговые, работают только на срез.

В общем случае при нагружении сварного соединения с угловыми швами в расчетном сечении возникает сложное напряженное состояние, и для определения величины эквивалентных напряжений, которые можно сопоставлять с характеристиками прочности металла шва, получаемыми при испытании на одноосное растяжение, необходимо пользоваться одной из теорий (критериев) прочности. Согласно этой теории прочности, опасное состояние материала при сложном напряженном состоянии наступает тогда, когда удельная потенциальная энергия изменения формы достигает величины, соответствующей пределу текучести при простом растяжении (IV теория прочности).

В соответствие с этой теорией компоненты поля напряжений, действующие в расчетной плоскости сечения, заменяют величиной эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{ЭКВ}}$, которое подсчитывают как:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sigma_x - \sigma_y \quad ^2 + \sigma_x - \sigma_z \quad ^2 + \sigma_y - \sigma_z \quad ^2 + 6 \tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2} \leq \sigma_m. \quad (4.21)$$

Пользуясь этой теорией прочности, Международный институт сварки (IIW) предложил метод расчета сварных соединений с угловыми швами, учитывающий сложное напряженное состояние в расчетном сечении шва (рис.4.13).

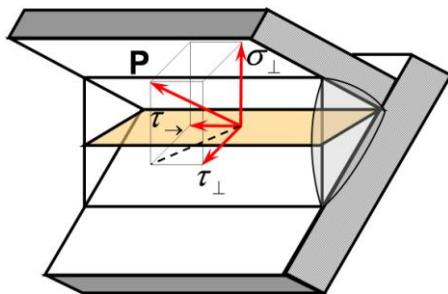


Рис. 4.13. Сложное напряженное состояние в расчетном сечении шва

В основе расчета угловых швов по методу IIW лежит следующее уравнение, полученное из критерия IV теории прочности:

$$\sigma = \eta \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \tau_{\perp}^2 + \tau_{\rightarrow}^2} . \quad (4.22)$$

Напряженное состояние характеризуют тремя составляющими (нормальное напряжение и две составляющие касательного напряжения, см. рис. 4.13). Левая часть уравнения выражает расчетное сопротивление металла шва разрушению, выраженное в данном случае в виде допускаемых напряжений при одноосном нагружении. Коэффициент η является эмпирическим и зависит от уровня предела текучести металла шва: $\eta=0,7$ при $\sigma_{02}=240$ МПа; $\eta=0,85$ при $\sigma_{02}=390$ МПа; $\eta=1,0$ при $\sigma_{02}=420$ МПа. Как видно, величина его повышается с увеличением прочности металла шва.

Метод IIW вошел в европейские и международные нормативные документы и широко используются в мировой практике. Например, европейский стандарт EN 1993 (части 1–8)²⁰ рекомендует при расчете сварных соединений стальных металлических конструкций использовать следующий метод:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \tau_{\perp}^2 + \tau_{\rightarrow}^2} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad \text{и} \quad \sigma_{\perp} \leq \frac{f_u}{\gamma_{M2}} , \quad (4.23)$$

где f_u – номинальное значение предела прочности основного материала, наименее прочной из соединяемых деталей; β_w – корректирующий множитель, зависящий от прочности основного материала на растяжение (табл. 4.4); $\gamma_{M2} = 1,25$ – коэффициент запаса прочности.

²⁰ EN 1993 – 1-8. Проектирование стальных конструкций. Проектирование соединений.



Таблица 4.4

Значение коэффициента β_w
в зависимости от прочности конструкционного материала*

Стандарт и марка стали			Коэффициент корреляции β_w
EN 10025	EN 10210	EN 10219	
S 235 S 235 W	S 235 H	S 235 H	0,8
S 275 S 275 N/NL S 275 M/ML	S 275 H S 275 NH/NLH	S 275 H S 275 NH/NLH S 275 MH/MLH	0,85
S 355 S 355 N/NL S 355 M/ML S 355 W	S 355 H S 355 NH/NLH	S 355 H S 355 NH/NLH S 355 MH/MLH	0,9
S 420 N/NL S 420 M/ML		S 420 MH/MLH	1,0
S 460 N/NL S 460 M/ML S 460 Q/QL/QL1	S 460 NH/NLH	S 460 NH/NLH S 460 MH/MLH	1,0

* В европейских стандартах, приведенных в табл.4.4, цифра, следующая после символа S, обозначает значение предела текучести конструкционного материала в МПа данной группы сталей. Следует иметь в виду, что гарантированные значения предела текучести зависят от толщины металла и с ее увеличением снижаются.

Стандарт предусматривает применение упрощенного метода расчета, когда учитывают только действие касательных напряжений, а наличие других компонентов игнорируют, но в этом случае в качестве расчетного сопротивления принимают величину предела прочности металла шва на растяжение.

4.8. Расчет тавровых соединений, выполненных с разделкой кромок

В тех случаях, когда расчетный размер шва превосходит 14мм, рекомендуется выполнять тавровые соединения с разделкой кромок с полным или частичным проплавлением (рис. 4.14). Кроме того, по сравнению с соединениями, выполненными без разделки кромок, соединения, выполненные с разделкой кромок, создают в корне шва значительно меньшую концентрацию напряжений.

Расчет таких соединений имеет некоторые отличия. На рис.4.14 показаны три характерных конструкции, на которых выделены пунктирными линиями расчетные сечения и обозначены параметры, принимаемые в расчет.

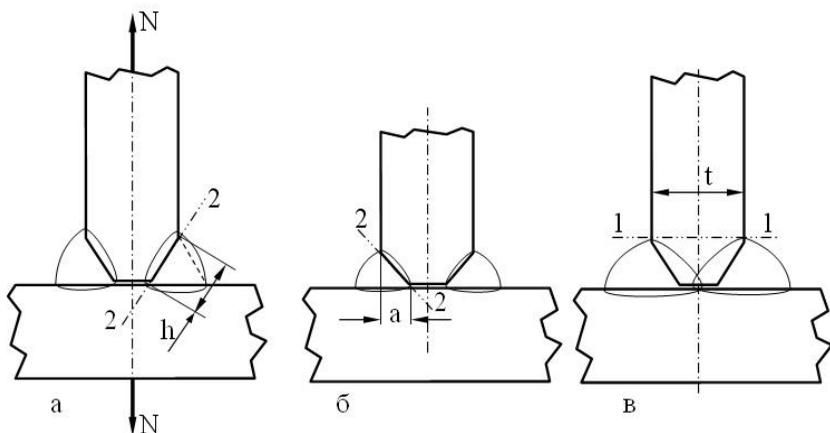


Рис. 4.14. Разновидности тавровых соединений с разделкой кромок: под произвольным углом (а); с углом скоса кромки 45° (б) и с полным проплавлением (в)

Сварные соединения с частичным проплавлением кромок рассчитывают на срез по металлу шва или по металлу границы зоны сплавления. СНиП II-23-81* в качестве расчетного параметра рекомендует принимать катет угла разделки «а» (рис.4.14,б). Вполне очевидно, что прочность соединения не может больше, чем прочность по зоне 1, поэтому в дополнение необходимо оценить прочность и этой зоны. СНиП II-23-81²¹ рекомендует следующие расчетные формулы для расчета тавровых соединений с разделкой кромок:

– по металлу шва

$$\frac{N}{2,6hl_w} \leq R_{wf} \gamma_{wf} \gamma_c ; \quad (4.24)$$

– по металлу границы сплавления

$$\frac{N}{2,8hl_w} \leq R_{wz} \gamma_{wz} \gamma_c , \quad (4.25)$$

где h – глубина разделки кромок, значения которой следует принимать согласно соответствующему стандарту на основные типы, конструктивные элементы и размеры сварных соединений; l_w – расчетная длина шва, равная полной его длине, уменьшенной на величину, равную толщине стенки t , или полной его длине в случае выво-

²¹ Пособие по расчету и конструированию сварных соединений стальных конструкций (к главе СНиП II-23-81). Утверждено приказом ЦНИИСК им. Кучеренко от 28.11.83 № 372/л.



Машины и автоматизация сварочного производства

да концов шва за пределы стыка. В формулах (4.24) и (4.25) учтено наличие двух швов в соединении.

Европейский стандарт EN 1993-1-8 рекомендует расчет сварных соединений с частичной разделкой кромок проводить так же, как и соединений без разделки кромок, используя в качестве расчетного параметра высоту вписанного в сечение шва треугольника.

Для соединений с полным проплавлением расчет выполняют по сечению 1, используя характеристики прочности основного металла, при этом сварочные материалы должны соответствовать по прочности основному металлу (см. рис. 4.14).

В том случае, когда тавровое соединение с неполным проплавлением усилено дополнительно наплавкой угловых швов, расчет производят по сечению 2 (рис.4.14,а), принимая в качестве расчетной высоты шва размер h .

4.9. Расчет тавровых соединений с учетом возможного расслоения основного металла

Тавровые соединения с лобовыми угловыми швами, нагруженные растягивающей силой по двум сечениям, следует дополнительно рассчитывать на растяжение по основному металлу в сечении, перпендикулярном направлению действия силы (рис. 4.6, сечение 4).

Такой расчет особенно важно производить для конструкций с толщиной более 20 мм из низкоуглеродистых сталей, недостаточно хорошо очищенных от вредных примесей, главным образом серы. В данном случае необходимо отметить, что легкоплавкие вредные примеси при производстве проката превращаются в тонкие пленки, расположенные в плоскости листа, что значительно снижает прочность металла при приложении силы перпендикулярно его поверхности. Прочность металла в этом направлении получила название «прочность в направлении Z».

Проблемы конструирования сварных соединений с учетом предотвращения слоистых разрушений будут рассмотрены ниже, когда речь пойдет о хрупком разрушении.

Рассмотрим методы расчета тавровых соединений с учетом возможности разрушения в направлении Z (рис.4.15).

В соединении с двухсторонним швом без разделки кромок (рис. 4.15,г) расчет по сечению 4 следует производить по формуле



Машины и автоматизация сварочного производства

$$\frac{N}{2,8\beta_f Kl_w} \leq R_{th}\gamma_c ; \tag{4.26}$$

в соединении с двухсторонним швом и к-образной разделкой кромок расчет по сечению 4 следует производить по формулам:

при полном проваре прикрепляемого элемента (рис. 4.15,в)

$$\frac{N}{1,3tl_w} \leq R_{th}\gamma_c ; \tag{4.27}$$

при частичном проваре прикрепляемого элемента (рис.4.15,б)

$$\overline{\left[2 h + 0,15t l_w \right]} \leq R_{th}\gamma_c ; \tag{4.28}$$

в соединении с односторонним швом и разделкой кромок при полном проваре прикрепляемого элемента (рис. 4.15,а) расчет по сечению 4 следует производить по формуле

$$\frac{N}{1,15tl_w} \leq R_{th}\gamma_c . \tag{4.29}$$

Здесь l_w – длина шва, принимаемая равной его полной длине; t – толщина прикрепляемого элемента; h – глубина разделки кромок; R_{th} – расчетное сопротивление растяжению в направлении толщины проката, которое следует принимать $R_{th} = 0,5 R_u$.

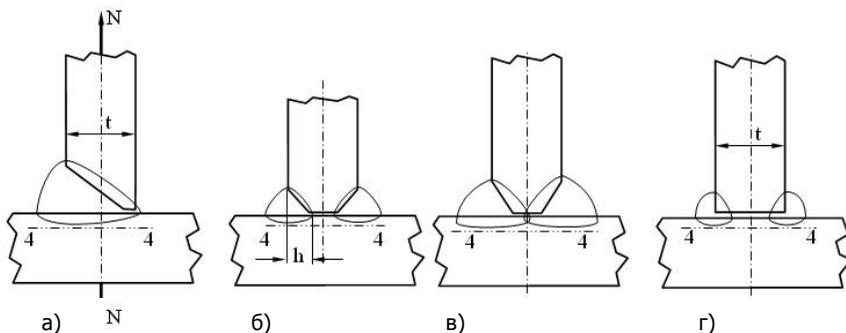


Рис. 4.15. Зоны возможного расслоения

СНиП II-23-81* допускает не производить расчет соединений по сечению 4 в следующих случаях:

– в соединениях с двухсторонним угловым швом без разделки кромок (рис. 4.15,г), а также с разделкой кромок и частичным проваром прикрепляемого элемента (рис.4.15,б), при условии, что предел



Машины и автоматизация сварочного производства

прочности основного металла привариваемого элемента меньше или равен пределу прочности второго элемента;

– в соединениях с двухсторонним угловым швом и к-образной разделкой кромок (рис. 4.15,в) при условии, что предел текучести основного металла привариваемого элемента не превышает 65% предела текучести второго элемента.

Ниже будут рассмотрены некоторые технологические и конструктивные приемы уменьшения риска слоистых разрушений.

4.10. Технологические ограничения минимального размера катета шва

В некоторых конструкция сварные швы могут не передавать нагрузку от одной детали к другой и служат только для их объединения в конструкцию. Такие швы называют «связующими», и расчет их размеров не производят, а принимают исходя из следующих технологических соображений.

Во-первых, сварные соединения должны обеспечивать целостность конструкции во время транспортировки и монтажа, когда возможно появление нагрузок на связующие швы.

Во-вторых, как будет рассмотрено ниже, при сварке возникают сварочные напряжения, которые также могут приводить к появлению сил в связующих швах.

В-третьих, и это, пожалуй, самая важная причина, по которой требуется ограничение минимального значения катета шва, – термическое воздействие сварки на основной металл. Эта проблема возникает при проектировании конструкций из низколегированных сталей, причем с увеличением содержания углерода и легирующих элементов она обостряется.

При выполнении швом с малым катетом на металле относительно большой толщины в зоне термического влияния могут появляться хрупкие закалочные структуры вследствие относительно малой погонной энергии при сварке и высокой скорости отвода тепла в металл большой толщины. В сочетании с другими неблагоприятными факторами это может вызвать появление холодных трещин. Другим фактором является то, что швы малого катета выполняют обычно на большой скорости, что сопровождается неблагоприятной схемой кристаллизации, и в случае избыточного присутствия вредных примесей в металле шва могут образовываться горячие трещины. Из-за опас-



Машины и автоматизация сварочного производства

ности образования холодных трещин ограничивают минимальное значение размера катета при сварке низколегированных сталей. Из-за опасности образования горячих трещин ограничивают минимальное значение размера катета при сварке малоуглеродистых сталей.

В нормативных документах, как правило, минимально допустимый размер катета шва зависит от толщины более толстой свариваемой детали и уровня прочности конструкционной стали. В табл.4.5 приведены рекомендации СНиП II-23-81* по определению минимального значения катета шва при сварке в строительстве. Аналогичные ограничения существуют практически во всех российских и международных документах, причем рекомендуемые в них значения достаточно близки между собой. Например, на рис. 4.16 для сравнения представлен график, на котором изображены ограничения на размер минимального катета по нормам Американского сварочного общества и по СНиП II-23-81*.

Таблица 4.5

Минимальные значения катета углового шва,
рекомендуемое СНиП II-23-81*

Предел текучести материала, МПа	Толщина наиболее толстого элемента, мм				
	6 – 10	11 – 16	17 – 32	23 – 32	33 – 40
225 – 275	4	4	5	5	6
310 – 390	4	5	6	7	8
410 – 440	5	6	7	8	9

Немецкие строительные нормы DIN 18000 рекомендуют следующие значения:

$$K_{\min} \geq 1,41 \sqrt{\delta_{\min}} - 0,5, \text{ при } \delta_{\min} \leq 30\text{мм};$$

$$K_{\min} = 7\text{мм при } \delta_{\min} > 30\text{мм}. \quad (4.30)$$

Данной рекомендации следует руководствоваться не только при определении размера связующих швов, но и в тех случаях, когда расчетное значение оказывается меньше минимального. В последнем случае рекомендуется использовать прерывистые швы, располагая их в цепном, а лучше в шахматном порядке.



Машины и автоматизация сварочного производства

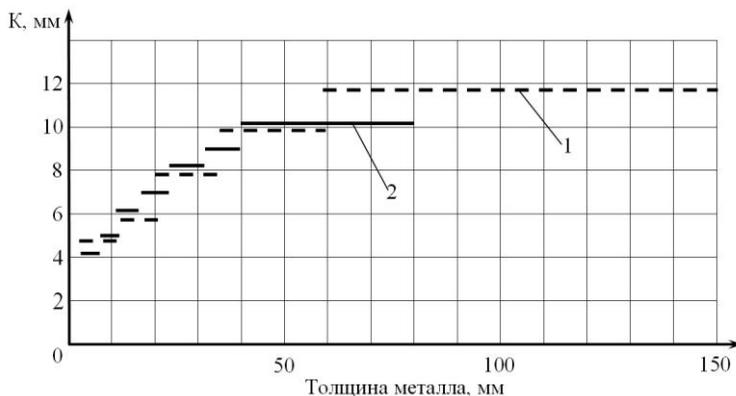


Рис.4.16. Рекомендуемое минимальное значение катета углового шва:
1 – стандарт американского сварочного общества; 2 – СНиП 2-23-81

Рекомендации по проектированию соединений с прерывистыми швами будут даны ниже.

4.11. Расчет элементов сварных конструкций с угловыми швами

4.11.1. Соединения с угловыми швами, нагруженные продольной силой в плоскости соединения

Такие соединения (рис.4.17) встречаются часто при проектировании узлов ферм, колонн, для соединения элементов конструкции накладками и др. Нахлесточные соединения выполняют фланговыми швами и комбинированными (фланговые вдоль накладки и лобовые в поперечном направлении). Иногда дополнительно накладки приваривают проплавленными или прорезными швами. Соединения стремятся проектировать так, чтобы прочность швов соответствовала прочности поперечного сечения того элемента, который приваривают этими швами, т.е. необходимо стремиться к достижению равенства прочности швов и привариваемых элементов.

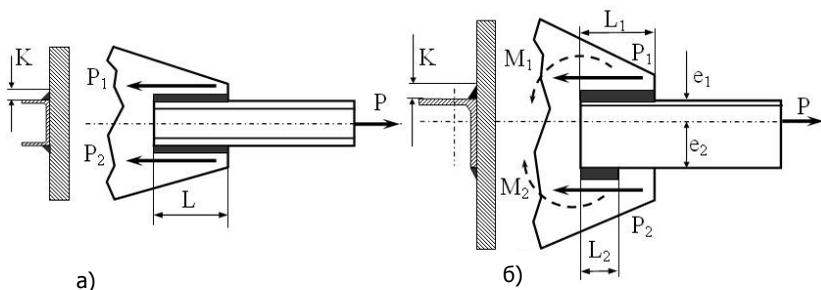


Рис. 4.17. Нахлесточные соединения с фланговыми швами

Фланговые и лобовые шва рассчитывают на действие только касательных напряжений. Поскольку расчет выполняют в упругой области, предполагается возможность применения принципа аддитивности, т.е. возможность сложения сил, отдельно действующих в каждом шве. Это принцип используется только в том случае, когда металл швов и основной металл нагружен не выше предела текучести.

Проверку проводят по двум возможным плоскостям разрушения: по металлу шва и по металлу границы сплавления. При расчете необходимо учитывать расположение швов по отношению к оси центров тяжести сечений привариваемого элемента.

В общем виде уравнение равновесия выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} P_1 + P_2 = 0 \\ M_1 + M_2 = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} L_{w1} K_1 \tau_1 + L_{w2} \tau_2 = 0 \\ L_{w1} K_1 e_1 \tau_1 + L_{w2} K_2 e_2 \tau_2 = 0 \end{cases}, \quad (4.31)$$

$$\tau = \min \left\{ \begin{matrix} R_{wf} \lambda_{wf} \gamma_c \\ R_{wz} \gamma_{wz} \lambda_c \end{matrix} \right\}. \quad (4.32)$$

Здесь индексом 1 отмечено все, что относится к шву №1; индексом 2 – к шву №2.

В практических расчетах часто поступают проще. Если для всех швов использовать одинаковые сварочные материалы и принять по конструктивным соображениям одинаковые значения катета шва (обычно его назначают равным толщине металла за минусом величины радиуса галтели сечения прикрепляемого элемента, если она имеется). Затем подсчитывают размер общей длины шва, обеспечивающего заданную несущую способность, по уравнению:



$$L_{\Sigma} = L_n + L_{\phi 1} + L_{\phi 2} = \frac{P}{K \tau} . \quad (4.33)$$

Далее, пользуясь принципом аддитивности, L_{Σ} делят, следующим образом: вначале вычитают длину лобового или двух лобовых, если они предусмотрены, шва. Длину лобового шва принимают равной ширине накладки. Оставшуюся часть расчетной длины делят между фланговыми швами обратно пропорционально их расстоянию от оси элемента (рис 4.17,б) для того, чтобы выполнить условие $\Sigma M=0$:

$$L_{\phi 1} = \frac{(L_{\Sigma} - L_n - 1)e_2}{e_1}; \quad L_{\phi 2} = L_{\Sigma} - L_n - L_{\phi 2} . \quad (4.34)$$

Значения e_1 и e_2 можно найти в справочниках геометрических характеристик профиля проката. Для равнополочных уголков $e_1 = 0,3$, $e_2 = 0,7$. В целях сокращения длины шва L_1 можно увеличить размер катета шва со стороны обушка уголка в 1,1–1,25 раза. Расчет при этом усложняется незначительно.

4.11.2. Расчет нахлесточных соединений, нагруженных моментом в плоскости соединения

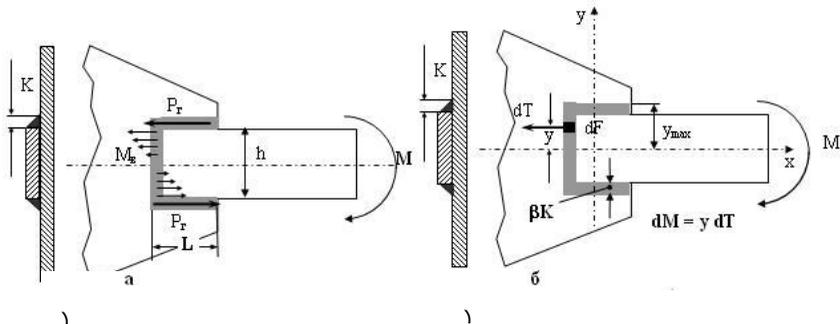
В практике проектирования таких соединений нашли распространение три метода: метод расчленения действующих сил на составляющие (рис.4.18,а); метод осевого момента инерции (рис.4.18,б) и метод полярного момента инерции (рис.4.18,в).

Первый метод (рис.4.18,а) предполагает, что действующему на соединение моменту противодействуют моменты сил, возникающие в расчетном сечении каждого шва:

$$M = M_r + M_b; \quad (4.35)$$

$$M_r = P_r(h + K) = \beta K L \tau (h+k); \quad (4.36)$$

$$M_e = W \tau = \frac{\beta K h^2 \tau}{6} . \quad (4.37)$$





Машины и автоматизация сварочного производства

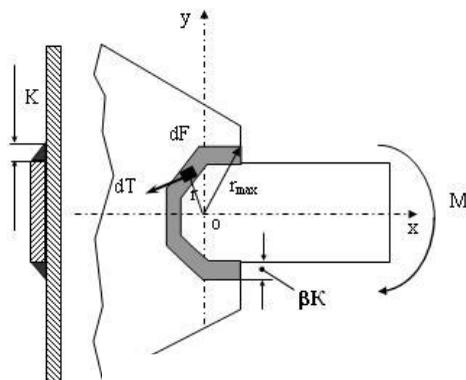


Рис.4.18. Схема расчета: а – метод расчленения сил на составляющие; б – метод полярного момента инерции; в – метод полярного момента инерции

Комбинируя (4.35)–(4.37), можно получить уравнение прочности сварного соединения по методу расчленения сил на составляющие:

$$\tau = \frac{M}{\beta K \left[L h + K + \frac{h^2}{6} \right]} \leq \tau . \quad (4.38)$$

Рассматривая метод осевого момента инерции, выделим на контуре шва (рис.4.18,б) площадку в расчетном сечении шва размером dF на расстоянии y от оси $X - X$. Сила $dT = \tau dF$, возникающая на этой площадке, создает момент $dM = ydT = y\tau dF$. Просуммируем элементарные моменты, действующие вдоль контура шва. Если принять условие, что напряжение τ , действующее в шве пропорционально расстоянию от оси $X - X$, и вынести коэффициент пропорциональности τ_1 за знак интеграла, то можно видеть, что значение интеграла выражает осевой момент инерции сечения следа швов $J_x = \int_F y^2 dF$:

$$M = \int_F y\tau dF; \text{ принимаем } \tau = \tau_1 y; \Rightarrow M = \tau_1 \int_F y^2 dF. \quad (4.39)$$

Основным уравнением в данном методе является $M = \tau_1 J_x$. Максимальная величина напряжений в шве действует в точке с координатой y_{\max} . Заменим τ_1 на $\tau_{\max} = \tau_1 y_{\max}$ и получим основное уравнение прочности соединения по методу осевого момента инерции:



Машины и автоматизация сварочного производства

$$\tau_{\max} = \frac{M}{J_x} y_{\max} \leq \tau \quad (4.40)$$

Преимуществом данного метода является то, что значения осевого момента инерции табулированы для многих геометрических фигур, что упрощает расчеты.

Метод полярного момента инерции (рис. 4.18,в) схож с предыдущим. Основным отличием является то, что в данном методе принята гипотеза о том, что силы, возникающие в шве, создают противомoment относительно центра тяжести сечения следа швов. Так же выделим на контуре шва площадку dF на расстоянии r от центра тяжести сечения шва, на которой сила $dT = \tau_1 r$, и проведем вычисления аналогично (4.39), заменив y на r . После преобразования получим основное уравнение по методу полярного момента инерции $M = \tau_1 J_p$, где J_p – полярный момент инерции следа сечения швов:

$$\tau_{\max} = \frac{M}{J_p} r_{\max} \leq \tau \quad (4.40)$$

Значения J_p табулированы для многих геометрических фигур, кроме того, иногда удобно воспользоваться вычислением значения полярного момента инерции через значения осевых моментов инерции ($J_p = J_x + J_y$):

$$\tau_{\max} = \frac{M}{J_x + J_y} \sqrt{x_{\max}^2 + y_{\max}^2} \leq \tau \quad (4.41)$$

где x_{\max}, y_{\max} – координаты максимально удаленной точки шва от центра тяжести сечения его следа.

Метод полярного момента инерции рекомендован СНиП II-23-81* для расчета прочности сварных соединений под действием момента в плоскости шва.



4.11.3. Расчет сварных соединений с угловыми швами под действием момента в плоскости, перпендикулярной плоскости расположения швов

Расчет такого соединения (рис.4.19) выполняют по двум возможным плоскостям разрушения: по металлу шва и по границе зоны сплавления:

$$\tau_f = \frac{M}{J_{xf}} y_{\max} \leq R_{wf} \lambda_{wf} \gamma_c; \quad \tau_z = \frac{M}{J_{xz}} y_{\max} \leq R_{wz} \gamma_{wz} \gamma_c, \quad (4.42)$$

где J_{xf} и J_{xz} – осевой момент инерции соответственно для плоскости, проходящей по металлу шва и по границе сплавления, которые подсчитывают, принимая ширину следа шва как $\beta_1 K$ или $\beta_2 K$.

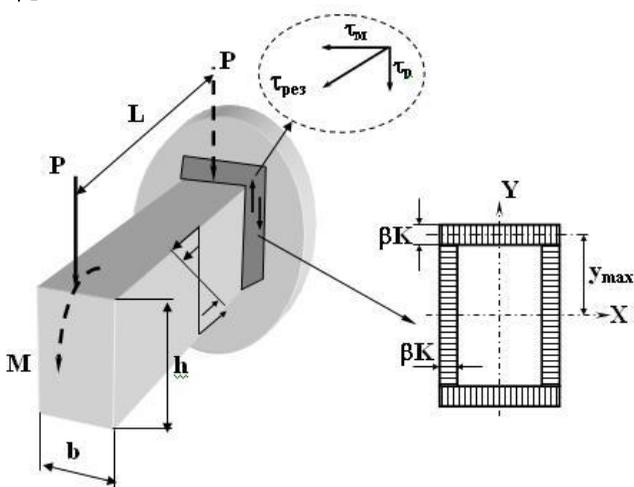


Рис. 4.19. Схема расчета прикрепляющих швов

Обычно изгибающий момент в прикрепляющих швах соединения возникает в результате действия поперечных сил, поэтому в большинстве случаев приходится учитывать действие двух силовых факторов: изгибающий момент и перерезывающую силу. Касательные напряжения, обусловленные действием этих силовых факторов, расположены во взаимно перпендикулярных направлениях. Для их совместного учета необходимо выполнить геометрическое суммирование (см. рис.4.19).

При параллельном переносе силы в плоскость шва возникает



Машины и автоматизация сварочного производства

изгибающий момент $M = PL$. Таким образом, в плоскости сечения шва (заштрихованная область) возникают касательные напряжения от момента τ_M и от перерезывающей силы τ_P . Результирующие напряжения равны:

$$\tau_{рез} = \sqrt{\tau_M^2 + \tau_P^2} \leq \tau, \quad (4.43)$$

касательные напряжения от действия момента равны:

$$\tau_M = \frac{M}{\beta J_x} y_{max}; \quad J_x = J_x^z + J_x^e; \quad J_x^e = \frac{Kh^3}{12};$$

$$J_x^z = \frac{b + 2K}{12} K^3 + bKy_{max}^2. \quad (4.44)$$

При подсчете величины момента инерции горизонтальных швов первый член суммы можно не учитывать как малозначимый.

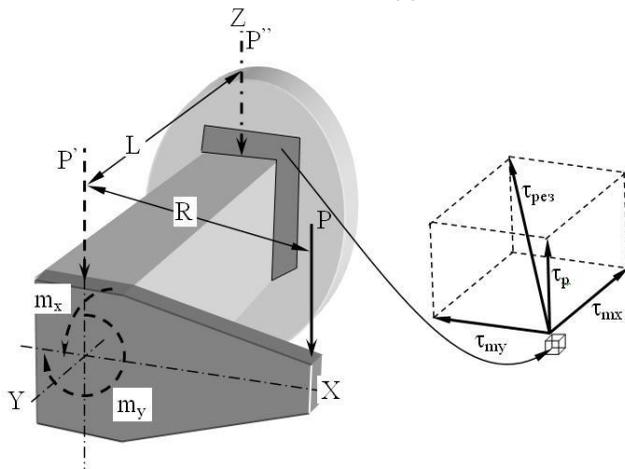
Принято считать, что *перерезывающую силу воспринимают только швы, расположенные вдоль действия силы*. Поэтому

$$\tau_P = \frac{P}{2\beta Kh}. \quad (4.45)$$

В общем виде уравнение прочности сварных соединений с прикрепляющими швами выглядит следующим образом:

$$\tau_{рез} = \sqrt{\left(\frac{M}{J_x} y_{max}\right)^2 + \left(\frac{P}{F_e}\right)^2} \leq \tau. \quad (4.46)$$

В тех случаях, когда сила, действующая на брус, смещена относительно его продольной оси Y (рис. 4.20), помимо изгибающего момента в плоскости шва, появляется крутящий момент.





Машины и автоматизация сварочного производства

Рис 4.20. Схема расчета прикрепляющих швов сварного соединения под действием трех силовых факторов P , m_y и m_x

При параллельном переносе действующей силы в плоскость шва появляются два момента: крутящий m_y и изгибающий m_x . В данном случае касательные напряжения от трех силовых факторов (P , m_y и m_x) действуют в разных плоскостях. Их векторное сложение позволяет выразить результирующие напряжения:

$$\tau_{рез} = \sqrt{\left(\frac{m_y}{J_x + J_z} \sqrt{x_{max}^2 + z_{max}^2}\right)^2 + \left(\frac{m_x}{J_x} z_{max}\right)^2 + \left(\frac{P}{F_g}\right)^2}. \quad (4.47)$$

Первое слагаемое выражает касательные τ_{my} напряжения в наиболее удаленной точке сечения ($x_{max}; z_{max}$), обусловленное крутящим моментом m_y ; второе слагаемое – касательные напряжения τ_{mx} от изгибающего момента m_x ; третье – τ_p , обусловленное действием силы P .

4.11.4. Расчет поясных швов балок

В поясных швах сварных балках при поперечном изгибе возникают касательные напряжения τ_Q , действующие вдоль шва (рис.4.21,а). Расчет таких швов производят по известной формуле Журавского:

$$\tau_Q = \frac{QS}{2\beta K J_x} \leq \tau, \quad (4.48)$$

где Q – величина перерезывающей силы; S – статический момент сечения балки, расположенного выше сварных швов (в частном случае полки) относительно оси X ; βK – ширина расчетного сечения углового шва; J_x – момент инерции сечения балки. Если сварные швы выполнены с полным проплавлением стенки, то в качестве ширины расчетного сечения принимают толщину стенки балки $\delta_{ст}$.

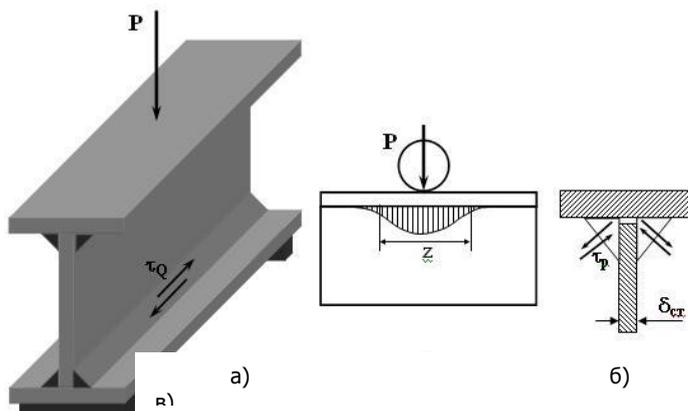


Рис. 4.21. Схема расчета поясных швов сварных балок

Если к поясу балки прикладывают сосредоточенную нагрузку P , например, в виде опорного катка подкрановой тележки, то в поясных швах появляются напряжения, обусловленные тем, что сила P частично передается через плотное прилегание стенки к поясу, частично через шов, так как в стыке возможны зазоры.

При расчете напряжений от силы P в качестве длины участка, который передает нагрузку через шов, принимают размер z , определяемый методом теории упругости:

$$z = 3,25 \sqrt[3]{\frac{J_n}{\delta_{cm}}}, \quad (4.49)$$

где J_n – момент инерции полки относительно собственной оси.

Напряжение от силы P определяют с учетом корректирующего множителя n ($n = 0-1,0$, рекомендуется $n = 0,4$), учитывающего частичное опирание полки на стенку:

$$\tau = \frac{nP}{2\beta Kz}. \quad (4.50)$$

С учетом векторного сложения касательных напряжений от силы P и от перерезывающей силы Q уравнение прочности сварных поясных швов выглядит следующим образом:

$$\tau_{pez} = \sqrt{\tau_Q^2 + \tau_P^2} \leq \tau. \quad (4.52)$$

В тех случаях, когда расчетное значение поясных швов оказывается меньше минимально допустимого по технологическим



Машины и автоматизация сварочного производства

соображением размера, выполняют прерывистые швы. Размер катета прерывистого шва определяют в зависимости от длины участков шва и шага прерывистых швов:

$$\tau_Q = \frac{QS}{2\beta K J_x} \cdot \frac{t}{l_{шв}} \leq \tau. \quad (4.53)$$

4.12. Расчет элементов сварных конструкций с точечными швами

Сварные соединения, выполненные контактной точечной сваркой, имеют весьма широкое распространение при проектировании тонколистовых конструкций благодаря значительно большей производительности контактной сварки по сравнению с другими способами. Сварные соединения проектируют так, чтобы они работали на сдвиг (рис.4.22,а), поскольку прочность точечных соединений на отрыв (рис.4.22,б) значительно ниже из-за высокой концентрации напряжений в периферийной части соединения. Основные размеры конструктивных элементов соединения устанавливают в соответствие с ГОСТ 15878-79.

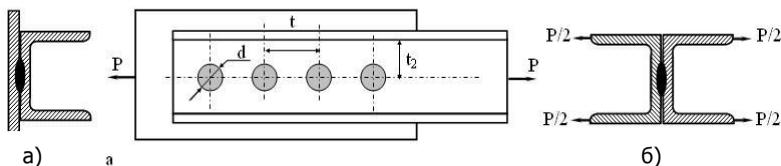


Рис. 4.22. Точечные соединения, работающие на сдвиг (а) и на отрыв (б)

Допускаемые напряжения определяют в зависимости от допускаемых напряжений для основного металла: $[\tau]_r \leq 0,5[\sigma]$; $[\sigma]_{от} = (0,25-0,30)[\sigma]$.

Уравнения прочности соединения, выполненного контактной точечной сваркой:

– при работе на сдвиг



Машины и автоматизация сварочного производства

$$\tau = \frac{P}{n \frac{\pi d^2}{4}} \leq \tau_T; \tag{4.54}$$

– при работе на отрыв

$$\sigma = \frac{P}{n \frac{\pi d^2}{4}} \leq \sigma_{OT}. \tag{4.55}$$

При расчете соединений, нагруженных моментом в плоскости соединения, используют метод, похожий на метод осевого момента инерции (рис.4.23).

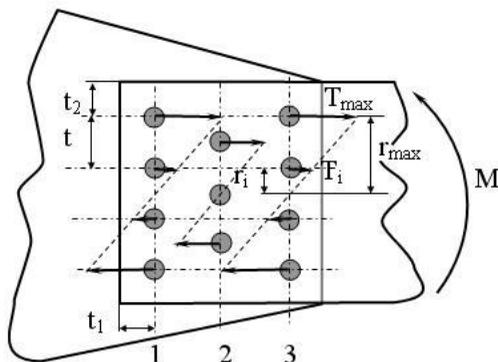


Рис. 4.23. Схема расчета соединения, нагруженного моментом в плоскости соединения

В каждом ряду точек определяют сумму моментов сил от касательных напряжений в каждой точке:

$$\Sigma m_i = \Sigma T_i r_i = \Sigma r_i \tau_i \frac{\pi d^2}{4}; \text{ принимаем } \tau_i = \tau_1 r_i \Rightarrow \Sigma m_i = \tau_1 \Sigma r_i^2 \frac{\pi d^2}{4}, \tag{4.56}$$

где r_i – координата i -й точки в ряду относительно горизонтальной оси; τ_i – касательное напряжение в i -й точке; τ_1 – единичное значение касательных напряжений.

Далее необходимо просуммировать моменты от касательных напряжений в отдельных рядах точек:

$$M = \tau_1 \frac{\pi d^2}{4} \sum_{1-k} \sum_i r_i^2, \tag{4.57}$$

Машины и автоматизация сварочного производства

где k – число рядов точек.

С учетом линейной зависимости касательных напряжений от координаты точек $\tau_{\max} = \tau_1 r_{\max}$ определим величину касательных напряжений в наиболее удаленной точке с координатой r_{\max} и запишем уравнение прочности нахлесточного точечного сварного соединения:

$$\tau_{\max} = \frac{4M}{\pi d^2 \sum_k \sum_i r_i^2} r_{\max} \leq \tau_T. \quad (4.58)$$

Точечную сварку часто применяют при изготовлении обогнутых тонкостенных балок из холодногнутой профили (рис.4.24).

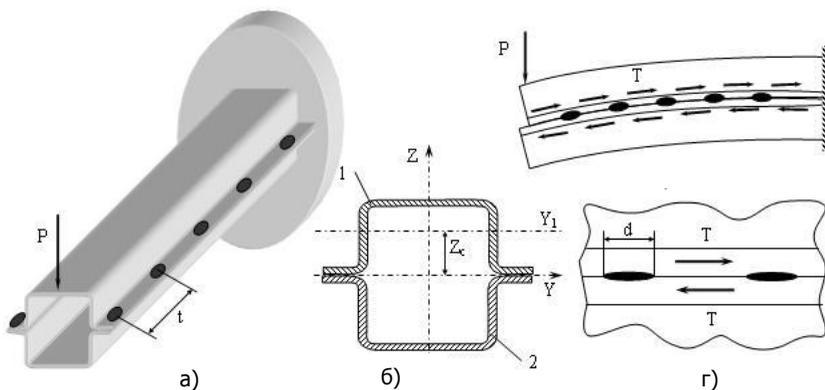


Рис.4.24. Схема расчета сварных точечных соединений, нагруженных касательными силами при поперечном изгибе балки

Поперечный изгиб балки вызывает появление в плоскости соединения сдвиговой силы T , которая на длине шага t и воспринимается соединением в пределах точки, т.е. на участке длиной d . В соответствии с формулой Журавского сдвиговую силу, накопленную на расстоянии между точками и воспринимаемую точками в каждом поперечном сечении соединения, можно определить следующим образом:

$$T = \frac{QS}{J_y} \cdot \frac{t}{d}. \quad (4.59)$$

Разделив накопленную силу на площадь точек, попадающих в сечении, можно записать уравнение прочности сварных точечных соединений балки:



Машины и автоматизация сварочного производства

$$\tau = \frac{T}{2F_T} = \frac{QS}{2 \frac{\pi d^2}{4}} \cdot \frac{t}{d} = \frac{2QS}{\pi d^3} \leq \tau_T, \quad (4.60)$$

где F_T – площадь одной точки диаметром d ; Q – перерезывающая сила; S – статический момент части сечения, расположенного выше плоскости соединения относительно собственной оси Y_1 , в частном случае (см. рис. 4.24) $S = F_{\text{сеч}} Z_c$; $F_{\text{сеч}}$ – площадь поперечного сечения части балки, расположенной выше плоскости соединения.

Пример расчета соединений, выполненных точечной сваркой, является частным случаем расчета соединений с прерывистыми швами независимо от того, каким методом сварки они выполняются.

Контрольные вопросы

1. С какой целью при расчете конструкций назначают коэффициент запаса прочности, что выражает и от чего зависит его величина при расчете по допускаемым напряжениям?

2. С какой целью при расчете сварных соединений назначают коэффициент прочности сварного соединения, от чего зависит его величина?

3. Что такое расчет конструкций по предельному состоянию, что означает предельное состояние конструкции, какие предельные состояния рассматривают при выполнении расчета, в чем преимущества данного метода расчета по сравнению с расчетом по допускаемым напряжениям?

4. Что принимают в качестве расчетного сечения при расчете сварных стыковых соединений, как проводят расчет стыковых соединений, выполненных с неполным проплавлением кромок или прерывистыми швами?

5. По каким расчетным сечениям проводят проверку прочности сварных соединений с угловыми швами?

6. Что принимают в качестве катета углового шва при расчете сварных соединений с угловыми швами?

7. В чем отличие расчета угловых швов по металлу шва и по границе зоны сплавления?

8. С какой целью при определении высоты расчетного сечения угловых швов вводят коэффициент β , что он выражает, от чего зависит его величина?



Машины и автоматизация сварочного производства

9. Какие существуют технологические возможности уменьшить размер катета углового шва при сохранении прочности соединения и какие должны быть даны указания в конструкторской документации, чтобы обеспечить возможность сохранения расчетной прочности?

10. В чем особенность проектировании и расчета сварных соединений деталей, расположенных под углом друг к другу, отличающемся от 90° ?

11. В чем особенность расчета сварных тавровых соединений, выполненных с разделкой кромок?

12. В каких случаях можно предполагать разрушение тавровых соединений в результате расслоения основного металла в зоне шва и как проводят проверку прочности соединения с учетом возможности такого разрушения?

13. По каким причинам ограничивают минимальное значение катета шва и от чего зависит это значение?

14. Как влияет направление действия силы на прочность соединения с угловыми швами, какие существуют методы расчета прочности угловых швов, учитывающие направление действия силы?

15. В чем состоит суть методов расчета сварных конструкций, нагруженных моментом в плоскости соединения?

16. В чем особенность расчета прикрепляющих швов, нагруженных несколькими силовыми факторами (силой, изгибающим, крутящим моментом)?

17. В чем особенность расчета сплошных и прерывистых поясных швов балок, нагруженных поперечным изгибом?

18. Как учитывается в расчете угловых швов асимметрия сечения элемента, привариваемого угловыми швами?

19. Особенности расчета соединений, выполненных контактной сваркой, как определяют величину допускаемых напряжений при расчете на срез и на отрыв?

20. В чем состоит суть методов расчета сварных точечных соединений, нагруженных моментом в плоскости соединения?

21. В чем особенность расчета сварных точечных соединений составных балок?



5. СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

5.1. Общая характеристика конструкций, работающих под давлением

К конструкциям такого типа относятся вертикальные цилиндрические резервуары для хранения жидких и сыпучих материалов; цилиндрические и сферические газгольдеры; воздухохранилища; котлы; теплообменные агрегаты; корпуса химических и атомных реакторов; топливные баки ракетно-космической техники и др. (рис.5.1). Отличительная особенность таких конструкций состоит в том, что напряжение, возникающее в стенке, является следствием давления хранящегося или транспортируемого продукта на стенку конструкции или вакуума. Как будет показано ниже, такой вид нагрузки приводит к появлению двухосного поля напряжений в стенке, если толщина стенки не превышает 0,1 его диаметра. При большей относительной толщине стенки в ней появляется объемное, трехосное напряженное состояние.

В зависимости от назначения размеры таких конструкций и толщина стенки могут изменяться в широких пределах (например, от нескольких миллиметров в баллонах для хранения сжиженного бытового газа до нескольких сотен миллиметров в корпусах реакторов).

Условия эксплуатации также разнообразны и в отношении агрессивности среды (нейтральные среды, кислоты, щелочи) и в отношении температуры (от нескольких десятков градусов по Кельвину до нескольких сотен). По этой причине для их изготовления используют широкий спектр конструкционных материалов: стали (углеродистые, низколегированные, легированные), сплавы на основе никеля, меди, алюминия, титана, а также полимерные материалы.

Под действием нагрузки (особенно при нагружении газовой средой) в корпусе таких конструкций накапливается большая потенциальная энергия, которая выделяется в процессе разрушения и, как правило, приводит к большим материальным потерям. Поэтому вопросам обеспечения безопасности таких конструкций уделяется



Машины и автоматизация сварочного производства



а)



б)



в)



г)

Рис. 5.1. Примеры сварных сосудов, работающих под давлением:

а – сферические газгольдеры объемом 2000 м^3 ;

б – вертикальный цилиндрический резервуар объемом $50\,000 \text{ м}^3$;

в – химический реактор;

г – корпус атомного реактора ВВЭР 1000;

д – воздухохсорник



д)

большое внимание и на стадии проектирования, и при изготовлении, и в процессе эксплуатации. Практически все конструкции, работающие под действием давления или вакуума, относятся к числу опасных технических устройств и находятся под надзором Ростехнадзора



Машины и автоматизация сварочного производства

ра России.

В связи с высоким уровнем риска эксплуатаций таких конструкций ряд стран законодательно устанавливает общие требования к обеспечению безопасности оборудования, работающего под давлением, на стадии проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации. Например, в странах ЕС основным документом, устанавливающим такие требования, является Директива 97/23/ЕС Европейского парламента и Совета от 29 мая 1997 г. В России действует специальный Технический регламент «О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением свыше 0,07 МПа или при температуре нагрева воды свыше 115°С». В настоящее время завершается разработка Технического регламента таможенного союза «О безопасности оборудования, работающего под давлением».

Проектирование, изготовление, монтаж и ремонт оборудования, работающего под давлением, обязательно должно производиться в строгом соответствии с нормативными документами.

В данной главе будут рассмотрены сосуды, работающие под избыточным внутренним давлением, с толщиной стенки, не превышающей 0,1 внутреннего диаметра (тонкостенные сосуды). На рис.5.2 показан типичный пример цилиндрического и сферического сосудов, работающих под давлением.

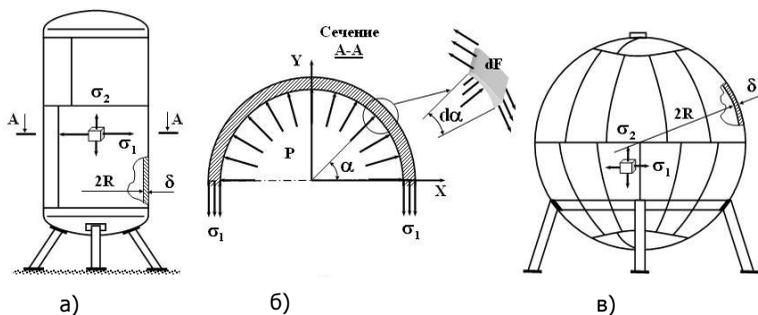


Рис. 5.2. Цилиндрический (а) и сферический (в) сосуды, нагруженные внутренним давлением

Вырежем мысленно из цилиндрического сосуда кольцо единичной ширины (рис.5.2,б). Под действием давления P на границах участка кольца площадью dF появляются силы в окружном направлении. Просуммируем проекции этих сил на ось Y и составим уравнения равновесия:

$$\sum dN_y = \sigma_1 \delta; \quad dN_y = PdF \sin \alpha = PRd\alpha \sin \alpha; \quad (5.1)$$



Машины и автоматизация сварочного производства

$$\sigma_1 \delta = \int_0^{\pi} PR \sin \alpha d\alpha = -PR \left(\cos 0 - \cos \frac{\pi}{2} \right) = PR; \quad (5.2)$$

$$\sigma_1 = \frac{PR}{\delta}. \quad (5.3)$$

Составим уравнение равновесия стенки сосуда в продольном направлении. Давление на днище сосуда уравновешивается напряжениями, действующими в стенке сосуда в продольном направлении:

$$P\pi R^2 = 2\pi R\delta\sigma_2 \Rightarrow \sigma_2 = \frac{PR}{2\delta}. \quad (5.4)$$

Можно видеть, что в стенке цилиндрического сосуда, нагруженного внутренним давлением, возникает двухосное растяжение, причем напряжение, действующее в окружном направлении в два раза больше, чем вдоль продольной оси сосуда $\sigma_1 = 2\sigma_2$.

Это частный случай уравнения Лапласа:

$$\frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} = \frac{P}{\delta}. \quad (5.5)$$

В случае сложного напряженного состояния, когда в стенке конструкции действует двухосное или трехосное напряженное состояние, в расчете используют эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{экв}}$, это напряжение, под действием которого материал в условиях простого растяжения-сжатия оказывается в равноопасном состоянии с рассматриваемым сложным напряженным состоянием.

Величину $\sigma_{\text{экв}}$ определяют по одной из теорий прочности. В частности, для тонкостенных сосудов применяют третью теорию прочности – теорию наибольшего касательного напряжения. Согласно этой теории предполагается, что предельное состояние материала наступает, когда наибольшее касательное напряжение достигает своего допустимого значения, которое определяется из опытов на растяжение-сжатие $\sigma_{\text{экв}} \leq [\sigma]$.

Для двухосного напряженного состояния, возникающего в стенке тонкостенного сосуда, $\sigma_{\text{экв}} = \sigma_1 - \sigma_3$. Так как $\sigma_3 = 0$, в рассматриваемом случае $\sigma_{\text{экв}} = \sigma_1 \leq [\sigma]$.

Таким образом, из уравнения Лапласа с учетом условий третьей теории прочности вытекает два частных решения:

– уравнение прочности для цилиндрического сосуда:



Машины и автоматизация сварочного производства

$$\sigma_1 = \frac{PR}{\delta} \leq \varphi \sigma ; \tag{5.6}$$

– уравнение прочности для сферического сосуда:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{PR}{2\delta} \leq \varphi \sigma , \tag{5.7}$$

где P – давление в сосуде; R – радиус средней линии сечения сосуда; δ – толщина стенки. Коэффициент прочности сварного шва и допускаемые напряжения определяют по соответствующим нормативным документам. Их ориентировочные значения приведены в главе 3 настоящего пособия.

Поскольку принципы расчета и проектирования различных оболочковых конструкций, нагруженных действием внутреннего давления, во многом схожи, рассмотрим в качестве примера сосуды, работающие под давлением.

В зависимости от расчетного давления, температуры стенки и характера рабочей среды ГОСТ 52630-2006²² подразделяет сосуды на группы (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Группы сосудов, работающих под давлением

Группа*	Расчетное давление, МПа	Температура стенки, °С	Рабочая среда
1	Более 0,07	Независимо	Взрывоопасная, пожароопасная или 1-го, 2-го классов опасности*
2	Более 0,07 до 2,5	Выше +400	Любая, за исключением указанной для 1-й группы сосудов
	Более 2,5 до 5,0	Выше +200	
	Более 5,0	Независимо	
	Более 4,0 до 5,0	Ниже -40	
3	Более 0,07 до 1,6	Ниже -20	Любая, за исключением указанной для 1-й группы сосудов
		Выше +200 до +400	
		До +400	
		До +200	
4	Более 0,07 до 1,6	От -40 до +200	
5а	До 0,07	Независимо	Взрывоопасная, пожароопасная или 1-го, 2-го, 3-го классов опасности*

²² ГОСТ 52630-2006. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические требования.



Машины и автоматизация сварочного производства

56	До 0,07	Независимо	Взрывоопасная, пожаро-опасная или 4-го классов опасности*
----	---------	------------	---

* Группа опасности определяется по ГОСТ 12.1.007

В зависимости от группы сосудов определяются требования к конструктивному оформлению элементов сосудов и размещению сварных швов; требования к качеству и объему контроля. ГОСТ Р 14249-2²³ и другие аналогичные нормативные документы регламентируют нормы проектирования. В качестве расчетного параметра принимают значение внутреннего диаметра сосуда D , тогда уравнение (5.6) приобретает иную форму:

$$\delta_p = \frac{pD}{2\varphi[\sigma] - p}. \tag{5.8}$$

Проектное значение толщины стенки сосуда получают путем добавления к расчетному значению прибавки «с», учитывающей возможное утонение стенки вследствие коррозии за период эксплуатации и возможное утонение по технологическим причинам ($\delta \geq \delta_p + c$). Технологическая прибавка предусматривает компенсацию утонения стенки элемента сосуда при технологических операциях: вытяжке, штамповке, гибке труб и т.д., поэтому проектное значение толщины стенки всегда больше расчетного. Полученное значение δ округляют до ближайшего большего стандартного значения толщины листового проката.

Сварочные материалы выбирают так, чтобы прочность сварного соединения не уступала прочности основного металла, поэтому расчет ведут по допускаемым напряжениям для основного металла с введением коэффициента прочности шва φ , величина которого зависит от методов и объема контроля. Если по технологическим причинам обеспечить равнопрочность сварного соединения не представляется возможным, например, из-за разупрочнения основного металла при сварке, в месте расположения продольных швов предусматривают утолщение кромок.

Продольные швы смежных обечаек и швы днищ в сосудах 1; 2; 3; 4-й групп (см. табл. 5.1) должны быть смещены друг относительно друга на значение трехкратной толщины наиболее толстого листа, но не менее чем на 100мм между осями швов. Допускается не

²³ ГОСТ Р 14249-2. Сосуды и аппараты нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических элементов, выпуклых и плоских днищ и крышек.



Машины и автоматизация сварочного производства

смещать швы в сосудах, работающих под давлением не более 1,6МПа и при температуре не более 400 °С, с толщиной стенки не более 30мм при условии, что эти швы выполнены автоматической или электрошлаковой сваркой, а места пересечения проконтролированы физическими методами в объеме 100% в сосудах групп 5а и 5б независимо от способа сварки.

Уравнения прочности (5.6)–(5.8) получены на основе безмоментной теории, т.е. в предположении, что в стене сосуда действуют только растягивающие напряжения, равномерно распределенные по толщине. В районе присоединения днищ и крышек появляются изгибающие моменты, и это условие нарушается.

На рис.5.3 показано распределение напряжений в окружном и меридиональном направлении при нагружении внутренним давлением эллиптического днища.

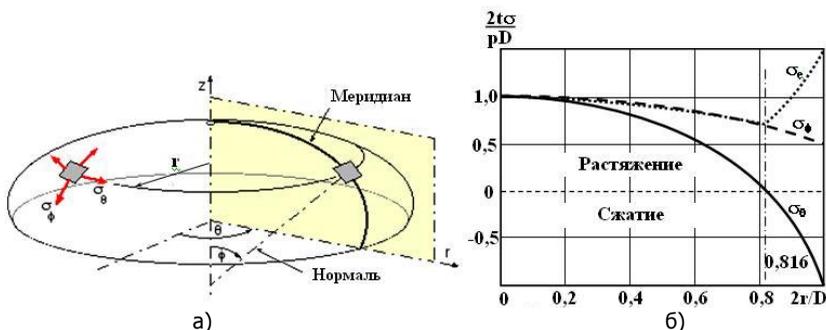


Рис.5.3. Координаты площадок (а) и распределение относительной величин напряжений на поверхности эллиптического днища (б)

Можно видеть, что по мере удаления от зенита напряжения σ_θ уменьшаются и в точках с координатой $2r/D > 0,8$ напряжения σ_θ меняют знак, переходя из растягивающих в сжимающие. В меридиональном направлении в точках с координатой $2r/D > 0,8$ в зоне сопряжения днища с цилиндрической частью (обечайкой) появляется изгибающий момент (рис.5.4). По этой причине в этой зоне не рекомендуется выполнять сварной шов. Обычно днища выпуклой формы изготавливают с цилиндрической частью для того, чтобы сварной шов вынести за пределы действия изгибающего момента. Высота цилиндрической части днища h должна быть не меньше $h > 0,8\sqrt{D\delta}$.

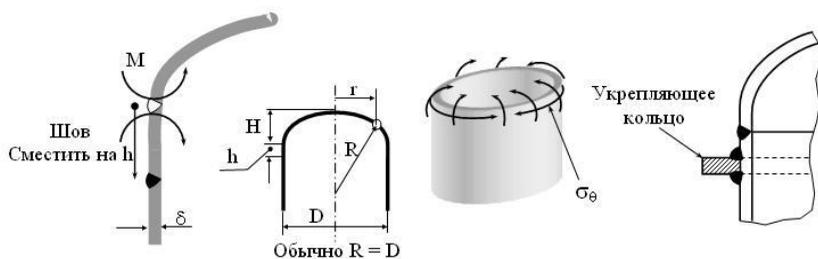


Рис.5.4. Действие изгибающего момента в зоне сопряжения дна с обечайкой

Кроме изгиба в зоне сопряжения действуют напряжения сжатия в окружном направлении. При малой жесткости сосуда (при малой толщине стенки и большом диаметре) возможна потеря устойчивости стенки сосуда. Для того чтобы предотвратить потерю устойчивости в зоне сопряжения, рекомендуется устанавливать ребро жесткости или утолщать стенку обечайки и край дна.

Величина изгибающего момента зависит от типа дна.

5.2. Расчет выпуклых и плоских дниц сосудов

Выбор типа дна определяется конструктивными и технологическими соображениями. Применение выпуклых дниц (рис.5.5,а-в) дает возможность уменьшить толщину, вес и расход конструкционного материала, уменьшить величину изгибающего момента в зоне перехода от дна к обечайке, но трудоемкость их изготовления значительно выше, чем для плоских дниц (рис.5.5,г).

При использовании выпуклых дниц наименьший изгибающий момент в зоне сопряжения появляется при торосферическом днище, наибольший – при полусферическом. Для уменьшения влияния изгибающего момента рекомендуется проектировать днища с отбортовой высотой для эллиптического дна $h > 0,8\sqrt{D\delta_p}$, для полусферического – $h > 0,3\sqrt{D\delta_p}$. Для малонагруженных сосудов допускается принимать неотбортованные днища.



Машины и автоматизация сварочного производства

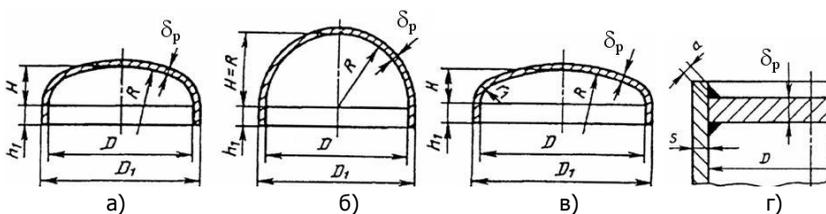


Рис.5.5. Типы днищ: а – эллиптическое; б – полусферическое; в – торосферическое; г – плоское

Выпуклые днища. Расчетную толщину стенки эллиптических и полусферических днищ определяют по уравнению:

$$\delta_p = \frac{pR}{2\varphi[\sigma] - 0,5p}. \quad (5.9)$$

Радиус кривизны в вершине днища равен:

$$R = \frac{D}{4H}, \quad (5.10)$$

где $R = D$ – для эллиптических днищ с $H = 0,25 D$ (H рекомендуется в пределах $0,2 \leq \frac{H}{D} \leq 0,5$); $R = 0,5 D$ – для полусферических днищ с $H = 0,5 D$.

Для торосферических днищ (рис.5.5,в) в зависимости от соотношения параметров R, d_1, r_1 (в соответствии с ГОСТ 14249-2) принимают следующие типы днищ:

- тип А: $R \approx D_1, r_1 \geq 0,095 D_1,$
- тип В: $R \approx 0,9 D_1, r_1 \geq 0,170 D_1,$
- тип С: $R \approx 0,8 D_1, r_1 \geq 0,150 D_1.$

Расчетное значение толщины стенки в краевой зоне определяют по формуле:

$$\delta_p = \frac{PD_1\beta_1}{2\varphi\sigma}, \quad (5.11)$$

где β_1 – коэффициент, величина которого находится в пределах от 0,9 до 2,5 в зависимости от типа днища (тип А; В; С) и отношения $P/[\sigma]$. Конкретное значение β_1 можно найти по номограмме, приведенной в ГОСТ 14249-2 и других нормативных документах.

Для сварных днищ необходимо дополнительно проверить толщину стенки в центральной зоне по формуле, приведенной ниже, и принять большее значение:



$$\delta_p = \frac{PR}{2\varphi \sigma - 0,5P}. \quad (5.12)$$

Проектное значение толщины стенки днища ($\delta \geq \delta_p + c$) получают путем добавления к расчетному значению поправки c ($c = c_1 + c_2 + c_3$), учитывающей возможное утонение стенки вследствие коррозии за период эксплуатации (c_1), компенсации минусового допуска (c_2) и возможное утонение по технологическим причинам (c_3). Например, при расчете корпусов сосудов и аппаратов, работающих под внутренним давлением в контакте с коррозионно-активными сероводородсодержащими средами, необходимо учитывать прибавку для компенсации коррозии не менее $c = 3$ мм (ГОСТ Р 52857.10-2007). Поправки c_1 и c_2 не учитывают, если их суммарная величина не превышает 5% от величины δ .

Заготовки выпуклых днищ допускается изготавливать из отдельных частей с расположением швов, как показано на рис.5.6. Расстояние l и l_1 на заготовках днищ должно быть не более 1/5 от внутреннего диаметра днища. Для заготовки с радиальным расположением швов (рис.5.6,л) количество лепестков не ограничивается.

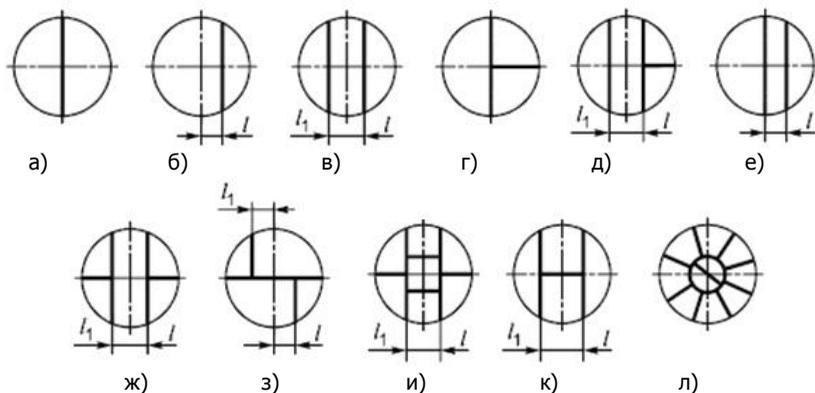


Рис. 5.6. Размещение сварных швов на заготовках выпуклых днищ

Допускается изготавливать днище из штампованных лепестков и сферического сегмента. Если по центру днища предусмотрено размещение штуцера, сферический сегмент можно не устанавливать. Круговые швы заготовок (рис.5.6,л) или штампованных лепестков и сферического сегмента должны располагаться на расстоянии от центра не более 1/3 внутреннего диаметра днища (для полусферических днищ этот размер не регламентируется). Наименьшее расстояние



Машины и автоматизация сварочного производства

между меридиональными швами в местах их примыкания к сферическому сегменту или штуцеру должно быть более трехкратной толщины металла, но не менее 100 мм. Сферические неотбортованные днища допускается применять в сосудах групп 5а и 5б.

Плоские днища. Расчетной моделью плоского днища является круглая пластина, или свободно опирающаяся по контуру (рис.5.7,а), или защемленная по контуру (рис.5.7,б).

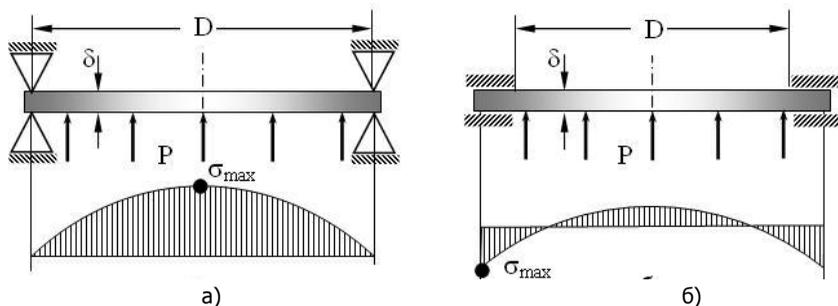


Рис. 5.7. Расчетная модель плоского днища

В первом случае на контуре поворот сечения не запрещен, а изгибающие моменты равны нулю. Радиальные напряжения достигают максимальной величины в центре пластины. Во втором случае поворот сечения на контуре запрещен, а изгибающие моменты и радиальные напряжения на контуре достигают максимальной величины, но величина этих напряжений меньше в центре свободно опирающейся пластины.

Максимальное напряжение в пластине:

$$\sigma_{\max} = KP \left(\frac{D}{\delta} \right)^2, \quad (5.13)$$

где К – коэффициент, учитывающий условия закрепления пластины на контуре при подсчете напряжений в центре пластины: для шарнирного закрепления по контуру 0,88, для жесткого защемления – 0,35.

Очевидно, что реальная схема закрепления плоского днища находится между этими крайними случаями. Если обечайка и плоское днище соединены сварными швами, то степень жесткости закрепления (величина коэффициента K_1) зависит от соотношения диаметра сосуда D , толщины его стенки s и толщины плоской крышки, а также от конструкции сварного соединения.



Машины и автоматизация сварочного производства

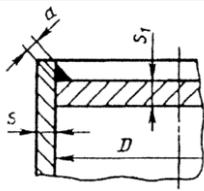
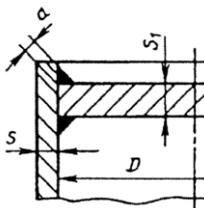
Толщину плоских круглых днищ сосудов и аппаратов, работающих под внутренним избыточным давлением, рассчитывают по формулам:

$$\delta_p = K_1 D_p \sqrt{\frac{P}{\varphi \sigma}}; \tag{5.14}$$

$$s_1 \geq \delta_p + c, \tag{5.15}$$

где K_1 – коэффициент жесткости закрепления плоского днища по контуру (табл.5.2); D_p – расчетное значение диаметра плоского днища, который во многих случаях принимают равным внутреннему диаметру сосуда; c – прибавка на коррозию и компенсацию технологического утонения.

Таблица 5.2
Условия закрепления плоского днища (выдержки из ГОСТ 14249-2)

Тип	Чертеж	Условия за- крепления днищ	K_1
1	2	3	4
1		$a \geq 1,7 \cdot s$ $D_p = D$	0,53
2		$a \geq 0,85 \cdot s$ $D_p = D$	0,50

Окончание табл. 5.2

1	2	3	4
---	---	---	---



Машины и автоматизация сварочного производства

4		$\frac{s-c}{s_1-c} < 0,5$ $\frac{s-c}{s_1-c} \geq 0,5$ $D_p = D$	<p>0,41</p> <p>0,38</p>
5		$a > 0,85 \cdot s$ $D_p = D$	<p>0,50</p>
6		$\frac{s-c}{s_1-c} < 0,5$ $\frac{s-c}{s_1-c} \geq 0,5$ $D_p = D$	<p>0,41</p> <p>0,38</p>
7		$\max \{s; 0,25 \cdot s_1\} \leq r \leq \min \{s_1; 0,1D\}$ $h_1 \geq r;$ $h_1 \geq 0,25 \sqrt{Ds}$ $D_p = D - 2r$	$K = \max \left\{ 0,41 \cdot \left(1 - 0,23 \frac{s-c}{s_1-c} \right); 0,35 \right\}$

В сосудах 1; 2; 3; 4-й групп рекомендуется использовать плоские днища конструкции 7 (см. табл. 5.2), изготовленные из поковок.

5.3. Укрепление отверстий в обечайках и днищах

Сосуды, работающие под давлением, и другие подобные конструкции имеют в корпусе отверстия различных размеров для размещения штуцеров для подвода и отвода продуктов, люков-лазов для инспекции внутренней поверхности сосуда, выводов для контрольно-измерительной аппаратуры и для иных технологических це-



Машины и автоматизация сварочного производства

лей. Например, сосуды диаметром более 800 мм должны иметь люк с внутренним диаметром не менее 450 мм, а сосуды, которые не имеют фланцевых разъемов и подлежат внутренней антикоррозионной защите, должны иметь люки с внутренним диаметром не менее 800 мм.

Очевидно, что при определенных размерах такие отверстия могут существенно ослаблять прочность сечения, в связи с чем возникает необходимость принимать конструктивные меры для укрепления сосуда в районе отверстий. Поскольку укрепление отверстий требует дополнительных затрат, необходимо определить максимальное значение диаметра отверстия, при котором укрепление еще не требуется.

Принципы конструирования элементов укрепления существенно не зависят от места размещения отверстия, поэтому рассмотрим их на примере цилиндрического сосуда с одиночным отверстием для штуцера. Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему другое отверстие не оказывает на него влияния, что имеет место, когда расстояние b между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b \geq \sqrt{d_{ш}^a s_{ш}^a - c} + \sqrt{d_{ш}^b s_{ш}^b - c}, \quad (5.16)$$

где $d_{ш}^a, d_{ш}^b$ – расчетный диаметр первого и второго штуцера $s_{ш}^a, s_{ш}^b$; – соответственно номинальная толщина стенок штуцеров (а) и (б); c – суммарная прибавка к толщине.

Расчетный диаметр отверстия, не требующий дополнительного укрепления стенки сосуда с расчетным диаметром D_p и с толщиной стенки s , определяют по формуле:

$$d_{0p} = 0,4 \sqrt{D_p s - c}. \quad (5.17)$$

Если сосуд имеет избыточную толщину стенки, то диаметр отверстия, не требующий укрепления, определяется по формуле:

$$d_{0p} = 2 \left(\frac{s-c}{s_p} - 0,8 \right) \sqrt{D_p s - c}. \quad (5.18)$$

Стенка сосуда с отверстием диаметром меньше (5.17) или (5.18) укрепления не требует.

Основной метод укрепления стенки состоит в том, чтобы за счет увеличения толщины стенки сосуда в районе отверстия и толщины части штуцера, примыкающей к сосуду, скомпенсировать площадь сечения, из-за присутствия отверстия. Следует обратить внима-



Машины и автоматизация сварочного производства

ние на то, что при этом концентрация напряжений не учитывается. В расчет принимается только площадь стенки сосуда в районе отверстия. Условие компенсации потерянной площади сечения $F_{отв}$ записывается следующим образом:

$$F_{отв} = d_{отв} - d_{0p} s_p = F_{yc}^{инн} + F_{yc}^{шв} + F_{yc}^к + F_{yc}^ч, \quad (5.19)$$

где $d_{отв}$, s_p – диаметр отверстия и расчетное значение толщины усиляемого элемента (обечайки); $F_{yc}^ч$, $F_{yc}^{инн}$, $F_{yc}^{шв}$, $F_{yc}^к$ – соответственно площади сечения участков усиления, размещенных на стенке цилиндрической обечайки; на штуцере, выступающем с наружной стороны обечайки, на штуцере, выступающем с внутренней стороны обечайки, площадь сечения укрепляющего кольца; d_{0p} – расчетный размер диаметра отверстия, не требующего укрепления.

При распределении площади усиливающих элементов необходимо учитывать, что наличие отверстия в стенке сосуда вызывает локальное возмущение поля напряжений, и область его воздействия охватывает зону, длина которой по образующей пропорциональна корню квадратному из произведения диаметра укрепляемого элемента на его толщину.

На рис.5.8 приведены обозначения укрепляемых зон около отверстия в обечайке. Расчетные длины внешней (l_{1p}) и внутренней (l_{3p}) частей круглого штуцера, участвующие в укреплении отверстий и учитываемые при расчете (рис.5.8,а), определяют по формулам:

$$l_{1p} \geq \{l_1; 1,25\sqrt{d + 2c_s} s_1 - c_s\}; \quad (5.24)$$

$$l_{3p} \geq \{l_3; 0,5\sqrt{d + 2c_s} s_3 - c_s - c_{s1}\}. \quad (5.25)$$

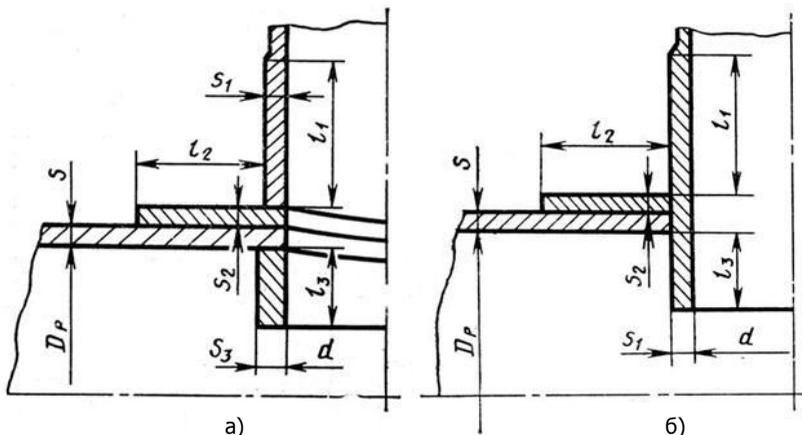


Рис.5.8. Элементы подкрепления стенки сосуда с отверстием диаметром d :
 а – составной штуцер; б – штуцер, проходящий через отверстие

Длина l_{3p} для штуцера, проходящего через отверстие (рис.5.8,б), определяют по (5.25), приняв $s_3 = s_1$.

Расчетную длину сечения накладного кольца определяют по формуле:

$$l_{2p} = \min \{ l_2; \sqrt{D_p s_2 + s_1 - c} \}. \quad (5.26)$$

Расчетную длину зоны цилиндрической обечайки, участвующей в укреплении стенки около отверстия определяют по формуле:

$$l_p = \min l; \sqrt{D_p s - c} . \quad (5.27)$$

Возвращаясь к уравнению (5.19), запишем:

$$F_{yc}^{мин} = 2l_{1p} s_1 - s_{1p} - c x_1; \quad F_{yc}^к = 2l_{2p} s_2 x_2;$$

$$F_{yc}^к = 2l_{3p} s_3 - c x_3; \quad F_{yc}^ч = 2l_p s - s_p - c . \quad (5.28)$$

В общем случае элементы, укрепляющие стенку сосуда, могут быть выполнены из металла, механические характеристики которого отличаются от прочности металла сосуда, поэтому при расчете площади поперечного сечения укрепляющего элемента вводится коэффициент $x_i = [\sigma]_i / [\sigma]_ц$ (i – номер укрепляющего элемента), учитывающий это различие.

Необходимо обратить внимание на то, что для участков цилиндрической обечайки и штуцера, расположенного с наружной стороны, при расчете площади укрепляющих элементов учитывается только часть толщины стенки, превышающая расчетное значение.



Машины и автоматизация сварочного производства

Распределение толщин укрепляющих элементов производят из конструктивных соображений.

Накладное кольцо рекомендуется устанавливать с наружной стороны. Если его толщина превышает толщину стенки сосуда более чем в два раза $s_2 > 2s_1$, то накладные кольца рекомендуется устанавливать снаружи и внутри сосуда или аппарата, причем толщина наружного кольца принимается $0,5 s_2$, внутреннего – $(0,5s_2 + c)$.

Некоторые нормативные документы, например EN 13445-3:2002(E)²⁴, дополнительно учитывают площадь поперечного сечения сварных швов, прикрепляющих штуцер и кольцо к обечайке.

Минимальный размер высоты сечения сварного шва определяют по следующим формулам:

для швов, прикрепляющих штуцер к корпусу сосуда:

$$a \geq 2,1 \frac{l_1 s_1}{d + 2s_1}; \quad (5.29)$$

для швов, прикрепляющих усиливающие кольца:

$$\left(1 + \frac{2l_2}{d + 2s_2}\right) a_1 + a_2 \geq 2,1 \frac{l_2 s_2}{d + 2s_1}. \quad (5.30)$$

Здесь a – высота сечения шва, прикрепляющего штуцер к корпусу сосуда (в том случае, когда штуцер проходит через стенку сосуда, шов с высотой сечения a выполняют как с наружной стороны, так и изнутри); a_1 – высота сечения шва, прикрепляющего усиливающее кольцо к корпусу сосуда; a_2 – усиливающее кольцо к штуцеру.

Не допускается применение угловых и тавровых швов с неполным проплавлением для соединения штуцеров, люков и других деталей в сосудах, относящихся к 1, 2, и 3-й группам при диаметре отверстия более 120 мм, а в сосудах 4-й и 5а групп – при диаметре более 275 мм. Не допускается применение швов с конструктивным непроваром в сосудах, предназначенных для работы в средах, вызывающих коррозионное растрескивание.

Отверстия для люков и штуцеров в сосудах групп 5а и 5б разрешается устанавливать на сварных швах без ограничения по диаметру отверстия.

В сосудах 1; 2; 3; 4-й групп рекомендуется располагать отверстия для люков и штуцеров вне сварных швов.

Допускается расположение сварных швов на:

²⁴ EN 13445-3:2002(E), Unfired pressure vessels – Part 3: Design. Сосуды работающие под давлением без огневого подвода тепла. – Ч. 3. Проектирование.



Машины и автоматизация сварочного производства

- продольных швах цилиндрических и конических обечайках, если диаметр отверстия не более 150 мм;
- кольцевых швах цилиндрических и конических обечайках без ограничения диаметра отверстия;
- швах выпуклых днищ без ограничения диаметра отверстия при условии 100% контроля сварных швов физическими методами контроля;
- швах плоских днищ.

Не разрешается располагать отверстия в местах пересечения сварных швов сосудов 1; 2; 3; 4-й групп.

При приварке к корпусу сосуда бобышек, патрубков штуцеров и люков, укрепляющих колец расстояние N (рис.5.9) между краем

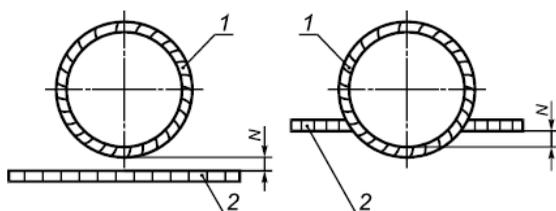


Рис. 5.9. Необходимое смещение швов соединения укрепляющего кольца, патрубка штуцера и люка (1) по отношению к продольному шву обечайки (2)

шва обечайки и краем шва привариваемой детали (укрепляющие кольцо, штуцер, люк) принимают не менее толщины стенки обечайки, но не менее 20 мм.

Для сосудов из углеродистых и низколегированных марганцовистых и марганцово-кремнистых сталей, подвергаемых термической обработке после сварки, расстояние N должно быть не менее 20мм независимо от толщины стенки корпуса сосуда. Допускается пересечение стыковых швов корпуса угловыми швами приварки внутренних и внешних устройств при 100% контроле участков пересечения швов физическими методами контроля.

По конструктивным и технологическим соображениям иногда применяют в месте присоединения штуцера торообразную вставку (рис.5.10,а) или вставку в виде кольца (рис.5.10,б), или образуют переход путем вытяжки стенки корпуса(рис.5.10,в).



Машины и автоматизация сварочного производства

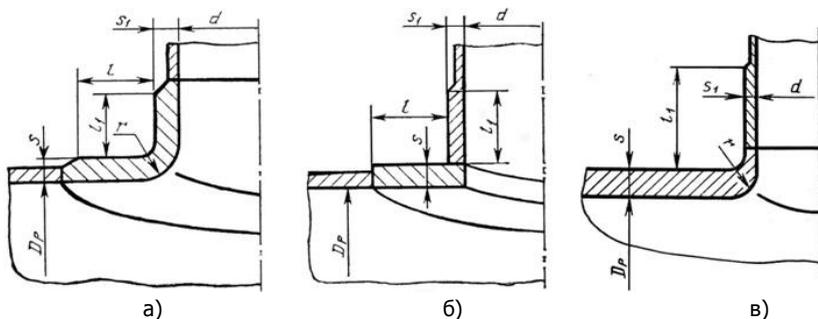


Рис. 5.10. Конструктивное исполнение узла штуцер – обечайка

Конструктивное исполнение (рис.5.10,а,в) рекомендуется применять при проектировании сосудов, работающих при переменных нагрузках, так как за счет плавного перехода в зоне сопряжения патрубка и сосуда удается значительно уменьшить концентрацию напряжений.

Для уменьшения концентрации напряжений в районе расположения сварного шва при сварке стыковых соединений разной толщины необходимо предусматривать плавный переход от одного элемента к другому постепенным утонением стенки более толстого элемента (рис.5.11). Угол скоса более толстого элемента должен быть не более 20° (1:3).

Сварку патрубков разной толщины рекомендуется выполнять в соответствии с рис.5.11,д,е, при этом расстояние l должно быть не менее толщины s , но не менее 20мм, а радиус $r \geq s_2 - s$.

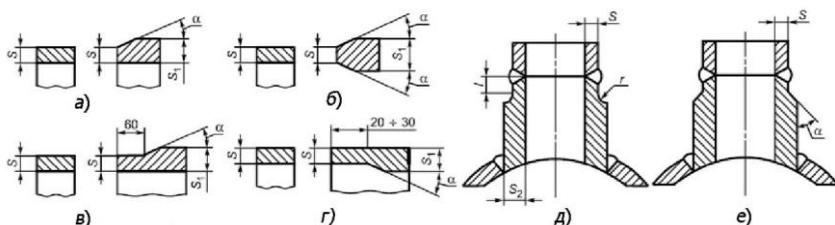


Рис. 5.11. Сварной стык элементов разной толщины
(в – для электрошлаковой сварки; г – для сварки на подкладном кольце)

Допускается выполнять сварку без предварительного утонения кромки более толстого элемента, если разность толщин не превышает 30% толщины более тонкого листа, но не более 5мм. При этом форма шва должна обеспечивать плавный переход от толстого



элемента к тонкому. В сосудах из двухслойной стали скос выполняют со стороны основного слоя.

5.4. Особенности расчета прочности сварных трубопроводов

В отличие от сосудов, работающих под давлением, нагрузки, воздействующие на сварные трубопроводы, более разнообразны по характеру и направлению. Помимо давления на стенки трубопровода транспортируемого продукта, при расчете толщины стенки необходимо учитывать, например, напряжения в стенке трубы, возникающие вследствие изгиба трубопровода при его прокладке и/или вследствие ветровой, снеговой нагрузки, веса транспортируемого продукта и собственного веса трубы при надземной прокладке, температурные напряжения, возникающие из-за различия температур при укладке и эксплуатации трубопровода, начальные напряжения, возникающие в процессе укладки трубопровода на продольных уклонах под действием веса труб, и др.

Все эти воздействия могут привести к существенному изменению величины напряжений в стенке трубы, действующих в продольном направлении. В связи с этим вначале определяют толщину стенки трубы исходя из величины давления транспортируемого продукта, затем производят проверочный расчет, учитывающий действие других нагрузок на трубопровод, в зависимости от особенностей его прокладки и условий эксплуатации.

Расчет напряжений от внутреннего давления P выполняют так же, как в случае сосудов, работающих под давлением:

$$\delta = \frac{nPD_n}{2 R_y + nP}, \quad (5.31)$$

где n – коэффициент надежности по нагрузке, учитывающий возможное увеличение внутреннего давления в переходных процессах; D_n – наружный диаметр трубы; R_y – расчетное сопротивление материала трубы;

$$R_y = \frac{R_{yn}m}{k_1 k_n}, \quad (5.32)$$

где m – коэффициент условий работы нефтепровода; k_1 – коэффициенты надежности по материалу; k_n – коэффициент надежности по назначению трубопровода.



Машины и автоматизация сварочного производства

При наличии продольных осевых сжимающих напряжений σ_{np} толщина стенки должна определяться с учетом действия второй компоненты напряжений и, поскольку ее величина меньше нуля, ее необходимо принимать во внимание при расчете величины эквивалентных напряжений согласно третьей теории прочности.

В нормативных документах, например, в отраслевом документе АК «Транснефть» РД-23.040.00-КТН-110-07²⁵, влияние второй компоненты напряжений при расчете толщины стенки учитывается введением в (5.31) коэффициента ψ :

$$\delta = \frac{nPD_n}{2 R_y \psi + nP}; \quad (5.33)$$

$$\psi = \sqrt{1 - 0,75 \left[\frac{|\sigma_{np}|}{R_y} \right]^2} - 0,5 \frac{|\sigma_{np}|}{R_y}. \quad (5.34)$$

Например, для прямолинейных и упругоизогнутых участков подземных нефтепроводов при отсутствии продольных и поперечных перемещений, просадок и пучения грунта продольные осевые напряжения, вызванные температурными деформациями, определяются по формуле:

$$\sigma_{np} = -\alpha E \Delta t + \mu \frac{nPD_{вн}}{2\delta}, \quad (5.35)$$

где α – коэффициент температурного расширения материала трубы; Δt – расчетный температурный перепад, °C; E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона.

Можно видеть, что первое слагаемое соответствует напряжениям от температурных деформаций, второе – представляет собой компоненту напряжений, обусловленную внутренним давлением транспортируемого продукта.

Очевидно, что напряжения, действующие вдоль трубы, могут быть следствием других воздействий, таких как силы, возникающие в процессе укладки трубопровода на продольных уклонах от действия веса труб, вызываемые горизонтальными деформациями грунта от горных выработок и др.

Главной особенностью сварных трубопроводов является то, что при их расчете необходимо принимать во внимание напряжения, действующие вдоль стенки трубы, поскольку их величина может быть

²⁵ РД-23.040.00-КТН-110-07. Магистральные нефтепроводы. Нормы проектирования.



Машины и автоматизация сварочного производства

сопоставима с напряжениями в окружном направлении. Действие напряжений сжатия в соответствии с теорией наибольшего касательного напряжения увеличивает величину эквивалентных напряжений и, как следствие, расчетное значение толщины стенки.

В формуле (5.33) действие напряжений сжатия учитывается путем введения коэффициента ψ , который уменьшает величину расчетного сопротивления материала. Например, если нагрузка, действующая вдоль трубопровода, вызывает напряжения сжатия $|\sigma_{np}| \approx 0,5 R_{\text{н}}$, то по формуле (5.34) коэффициент $\psi \approx 0,65$ и толщина стенки трубы δ по (5.33) увеличивается приблизительно на 30%.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем отличается напряженное состояние сварного стыкового соединения стенки сосуда, нагруженного внутренним давлением, от напряженного состояния стыкового шва стержня?

2. В чем отличие напряженного состояния сварного стыкового соединения стенки сосудах сферической и цилиндрической формы, нагруженных внутренним давлением?

3. Как следует выбирать сварочные материалы для сварных соединений корпуса сосуда, работающего под давлением?

4. Что следует предпринять при проектировании сосудов, чтобы сварные соединения не вынуждали конструктора увеличивать толщину стенки?

5. На каком основании при определении толщины стенки сосуда в расчетных формулах присутствует только напряжение, действующее в окружном направлении, несмотря на то, что в стенке сосуда, нагруженного внутренним давлением, действует двухосное поле напряжений?

6. По какой причине сварной шов, присоединяющий выпуклое днище к цилиндрической обечайке сосуда, рекомендуется смещать в сторону обечайки?

7. По какой причине и с какой целью в зоне сопряжения обечайки и днища тонкостенного сосуда, работающего под давлением, устанавливают ребро жесткости.

8. Какие требования предъявляют к размещению сварных швов на заготовках выпуклых днищ?

9. Как производят расчет днищ сосудов, работающих под давлением, и в чем различие расчета выпуклых и плоских днищ?



Машины и автоматизация сварочного производства

10. С какой целью производят укрепление стенки сосуда с отверстием для штуцера или люка?

11. Как определяют площадь сечения деталей, компенсирующих снижение прочности стенки сосуда из-за присутствия отверстия?

12. Как определяют размер зоны, в которой допускается размещать дополнительные элементы для укрепления стенки сосуда?

13. Какие существуют конструктивные решения укрепления сосуда в районе размещения штуцера?

14. Какие предъявляют требования к сварке деталей, отличающихся по толщине?

15. Чем отличается расчет толщины стенки сварного трубопровода от расчета сосуда, работающего под давлением?