

**С.Б. Андреев
В.С. Головченко
В.Д. Горбач
В.Л. Руссо**



ОСНОВЫ СВАРКИ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**С.А. Андреев,
В.С. Головченко,
В.Д. Горбач,
В.Л. Руссо**

ОСНОВЫ СВАРКИ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Рекомендовано УМО по образованию в области
кораблестроения и океанотехники для студентов высших
учебных заведений, обучающихся по направлению
подготовки дипломированных специалистов 180100
(652900) «Кораблестроение и океанотехника» и
направлению подготовки бакалавров 180100 (552600)
«Кораблестроение и океанотехника»*



С.-Петербург
«Судостроение»
2006

ББК 30.61
075

*Федеральная целевая программа «Культура России»
(подпрограмма «Поддержка полиграфии и книгоиздания России»)*

*Издание выпущено при поддержке
Комитета по печати и взаимодействию
со средствами массовой информации Санкт-Петербурга*

Рецензенты: д. т. н., проф. Н. А. Соснин – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет; д. т. н., проф. В. В. Смирнов – ОАО «Институт сварки России»

075 Основы сварки судовых конструкций: Учебник / С. Б. Андреев, В. С. Головченко, В. Д. Горбач, В. Л. Руссо. Под общ. ред. В. Л. Руссо. – СПб.: Судостроение, 2006. – 552 с.: ил.

ISBN 5-7355-0669-2

Учебник написан в соответствии с учебным планом дисциплины «Сварка судовых конструкций», специальность «Кораблестроение». Отдельные главы могут быть использованы студентами, обучающимися по специальности «Оборудование и технология сварочного производства», а также инженерно-техническими работниками области проектирования и постройки судов.

Материал знакомит с физической сущностью процесса сварки и разновидностью ее способов и методов расчета, технологией сварки различных видов стали, цветных металлов и сплавов, способами наплавки.

Широко использованы результаты исследований в области сварки, учтен опыт и достижения заводов и верфей, отражены изменения, произошедшие в производстве судовых конструкций за последние 25 лет.

ББК 30.61

ISBN 5-7355-0669-2

© С. Б. Андреев, В. С. Головченко,
В. Д. Горбач, В. Л. Руссо, 2006
© Издательство «Судостроение», 2006

ПРЕДИСЛОВИЕ

За последние 25 лет в сварочном производстве изготовления металлоконструкций в различных отраслях промышленности произошли большие изменения. Появились новые металлические материалы, что привело к необходимости разработки и совершенствования технологических процессов их сварки, разработке новых сварочных материалов, созданию нового поколения сварочного оборудования для механизированных способов сварки и автоматизации процессов производства сварных конструкций. Все это в полной мере затронуло и судостроение.

В предлагаемом учебнике авторы пытаются отразить изменения, произошедшие в сварочном производстве судовых конструкций, предложив такую его структуру, которая предусматривает последовательное изложение основ сварки. В соответствии с учебным планом дисциплины «Сварка судовых конструкций», читаемой студентам по специальности «Кораблестроение», знакомят будущего инженера-корабеля с физической сущностью и разновидностями существующих способов сварки, формированием шва и строением сварного соединения, основами технологии сварки низкоуглеродистых, низколегированных, высоколегированных сталей, цветных металлов и их сплавов. В должной мере отражены вопросы контроля качества сварки, ее тепловые основы, механизм образования остаточных сварочных напряжений и деформаций прочности и коррозионной стойкости сварных соединений.

Следует отметить, что изначальной задачей при написании учебника было донесение в возможно общей и доступной форме тех знаний, которые могут понадобиться инженеру-корабелю и могут быть использованы им при проектировании, конструировании и изготовлении различных судостроительных конструкций.

Студентами, обучающимися по специальности «Оборудование и технология сварочного производства», могут быть использованы разделы, в которых рассматриваются вопросы технологии сварки цветных металлов, тепловых основ сварки, образования остаточных напряжений и деформаций.

Учебник может также служить для подготовки специалистов других специальностей, если им читается общий курс сварки металлов, быть полезен для инженерно-технических работников судостроительной промышленности, а в ряде случаев и аспирантам технических специальностей.

Учебник написан коллективом авторов:

д.т.н. В. Д. Горбач – глава 1;

д.т.н. В. Л. Руссо – главы 2–5, 8–12;

д.т.н. В. С. Головченко – глава 6;

д.т.н. В. Д. Горбач и д.т.н. В. Л. Руссо – глава 7;

к.т.н. С. Б. Андреев – главы 13–19;

д.т.н. В. Д. Горбач и к.т.н. С. Б. Андреев – глава 20.

Авторы выражают благодарность доктору технических наук профессору В. В. Смирнову, доктору технических наук профессору Н. А. Сошнину за ценные замечания, сделанные при рецензировании рукописи и позволившие улучшить содержание учебника, и инженеру Л. В. Лепшиной за большую техническую работу при оформлении рукописи.

Все замечания и предложения по настоящему изданию учебника авторами будут приняты с благодарностью.

1. СВАРКА, ЕЕ ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ И ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ СУДОСТРОЕНИЯ

1.1. КРАТКАЯ ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА О РАЗВИТИИ СВАРОЧНОЙ ТЕХНИКИ В СУДОСТРОЕНИИ

Русские ученые Николай Николаевич Бенардос (в 1882 г.) и Николай Гаврилович Славянов (в 1888 г.) прославили Россию своими замечательными изобретениями. Первый изобрел электрическую дуговую сварку угольным электродом, второй – электрическую дуговую сварку плавящимся электродом. В свое время они сами считали свои изобретения важными, однако, вряд ли могли предполагать, что открытые ими способы соединения металлов (да и не только металлов) через столетие станут ведущими технологическими процессами изготовления и ремонта металлических конструкций самых различных назначений.

Надо отметить, что сварка, как процесс соединения металлических частей изделий, известна давно. Еще в древности люди научились добывать и обрабатывать железо и изготавливать путемковки из его нагретых частей различные изделия. С начала XIX в. применялся так называемый способ сварки «литьем». Этот способ по существу является разновидностью обычного литья, когда две металлические детали соединялись заливкой расплавленного металла в зазор между ними.

Что же стоит за термином сварка? ГОСТ 2601-74 «Сварка металлов. Основные понятия, термины и определения» предлагает следующую формулировку: «Сварка – процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями при их местном или общем нагреве или пластическом деформировании, или совместном действии того и другого». Отсюда в классификации способов сварки и принято делить все существующие способы на два крупных класса: сварка плавлением и сварка давлением. В наше время существует большое количество способов сварки в каждом из указанных классов.

Сущность способа Н. Н. Бенардоса (рис. 1.1, а) заключается в том, что между угольным электродом и изделием, подключенными к аккумулятору, возникает электрическая дуга, приводящая к плавлению

металла изделия. В область дуги сбоку вводится добавочный металл в виде присадочного прутка для обеспечения формирования сварного шва. Способ Н. Г. Славянова отличается тем, что в качестве электрода применен металлический плавящийся стержень, который поддерживает горение дуги и, одновременно расплавляясь, формирует шов (рис. 1.1, б). Следует отметить, что Славянов разнообразил свое изобретение и на многие его виды получил патенты в ряде стран. Его предложения впоследствии были развиты русскими учеными и получили широкое распространение в мировой промышленности. Славянов был пионером использования электросварки в судостроении, применив ее для ремонта деталей судовых механизмов. Однако в заметных объемах электросварка в России начинает применяться только в 20-х гг. прошлого столетия.

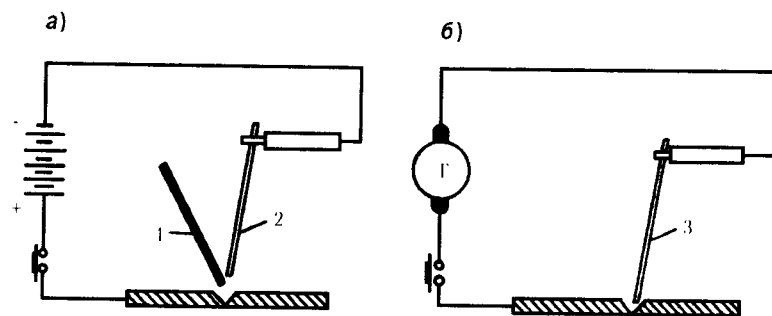


Рис. 1.1. Схемы способов сварки:

а — Н. П. Бенардоса; б — Н. Г. Славянова;

1 — присадочный пруток; 2 — неплавящийся электрод; 3 — плавящийся электрод

Много для развития сварки в отечественном судостроении сделал профессор Виктор Петрович Вологдин. Он первый применил электросварку по методу Славянова на Дальзаводе в г. Владивостоке, где в 1926 г. было организовано производство сварных котлов, а в 1930 г. построен первый цельносварной корпус морского буксира. В. П. Вологдин впервые в стране организовал подготовку инженеров-сварщиков, первый выпуск которых состоялся в Дальневосточном политехническом институте в 1930–31 гг. Впоследствии (1934–1949 гг.) Вологдин возглавлял кафедру сварки Ленинградского кораблестроительного института. В эти годы он много сделал для того, чтобы сварка стала ведущим технологическим процессом в отечественном судостроении, так же, как и пришедший ему на смену профессор Георгий Александрович Бельчук.

Опыт применения электросварки на Дальзаводе постепенно распространялся на другие судостроительные заводы страны. В 1935 г. в Ленинграде был построен первый крупный полусварной морской пароход «Седов», на ряде заводов начата постройка сварных доков, тепловозов для Каспийского моря и других цельносварных судов.

К началу Великой Отечественной войны сварка почти полностью вытеснила клепку. В 1939 г. клепка для изготовления речных судов была запрещена постановлением правительства. В годы войны все корпуса строящихся тогда судов, как и их ремонт, выполнялись только с помощью электросварки. Это было время перехода от изготовления клепаных корпусов к сварным, и по своему значению оно так же революционно, как время перехода строительства деревянных судов к металлическим.

Переход к сварному судостроению был непрост и потребовал проведения достаточно большого объема самых разнообразных научно-исследовательских работ для того, чтобы убедиться в абсолютной надежности сварных соединений и возможности безаварийной длительной эксплуатации сварных корпусов судов и кораблей различного назначения.

При соединении двух листов с помощью клепки на стык накладываются дополнительные полосы металла (с одной или двух сторон листа), проводится сверловка отверстий, затем в отверстия вставляются заранее нагретые до высоких температур заклепки, торцы которых осаживаются специальным инструментом до получения плотного соприкосновения соединяемых деталей. При больших объемах изготовления металлических конструкций процесс весьма трудоемок и малопроизводителен. Сварное соединение значительно проще по своей конструкции. Здесь кромки собранных в соответствии с чертежом деталей расплавляются тем или иным способом, образуя монолитное неразъемное соединение. Наряду с тем, что эти оба вида обеспечивают получение прочно-плотного соединения, сварка дает следующие преимущества:

- 1) масса сварной конструкции уменьшается на 15...20% из-за отсутствия в ней перекоев или дополнительных накладок;
- 2) резко снижается трудоемкость изготовления конструкции (отпадает необходимость разметки, сверления большого количества отверстий, изготовления накладок и заклепок, а также трудоемкий процесс нагрева заклепок и самой клепки);
- 3) появляется возможность совершенствования форм конструкции, так как технологическая свобода при применении сварки чрезвычайно велика;

- 4) появляются возможности для механизации процесса, что связано с относительной простотой сварных соединений;
- 5) труд при изготовлении сварных конструкций менее тяжел, нежели при изготовлении клепаных конструкций;
- 6) при применении современных способов сварки (механизированной под флюсом и в среде защитных газов) улучшаются экологические характеристики процесса.

Применение сварки кардинально изменило технологические процессы изготовления корпусов судов. Так, 60...70% сборочно-сварочных работ выполняются в сборочно-сварочных цехах, где изготавливаются секции либо блоки, которые с высокой степенью готовности затем передаются на стапель, где из них формируется и сваривается корпус судна. Большой объем сварочных работ производится при изготовлении различных изделий судового машиностроения и энергетики. Сварка здесь позволяет создавать комбинированные лито-сварные либо штамповарные конструкции, конструкции из различных материалов.

За последние несколько десятилетий значительно увеличился объем научных исследований во всех областях сварочного производства. Это привело к созданию новых марок сварочных материалов (электродов, сварочных проволок, флюсов и т. д.), что было связано с расширением номенклатуры сталей и сплавов, применяемых в различных отраслях промышленности. Несомненный прогресс наблюдается в области разработки и применения новых источников питания, создания универсальных автоматов и полуавтоматов различного назначения, новых прогрессивных технологий изготовления сварных конструкций. Из года в год увеличивался объем применения механизированных способов сварки, особенно в среде защитных газов, достигнув в настоящее время 50...60%. Начинают появляться роботизированные комплексы на поточных линиях изготовления узлов. На рис. 1.2 показана динамика применения механизированных способов сварки в судостроении.

Практически нет способа сварки, который не применялся бы в судостроении. Для машиностроительных конструкций, котлов высокого давления и корпусов реакторов с успехом применяется электрошлаковая сварка. Для изделий энергетики и приборостроения находит применение электронно-лучевая и лазерная сварка. Разработанные процессы плазменно-воздушной резки позволили улучшить качество вырезаемых деталей, уменьшить их деформации и этим создать условия для расширения применения механизированных способов сварки. В этом отношении являются перспективными разработки по созданию технологии лазерной резки, что направлено на дальнейшее

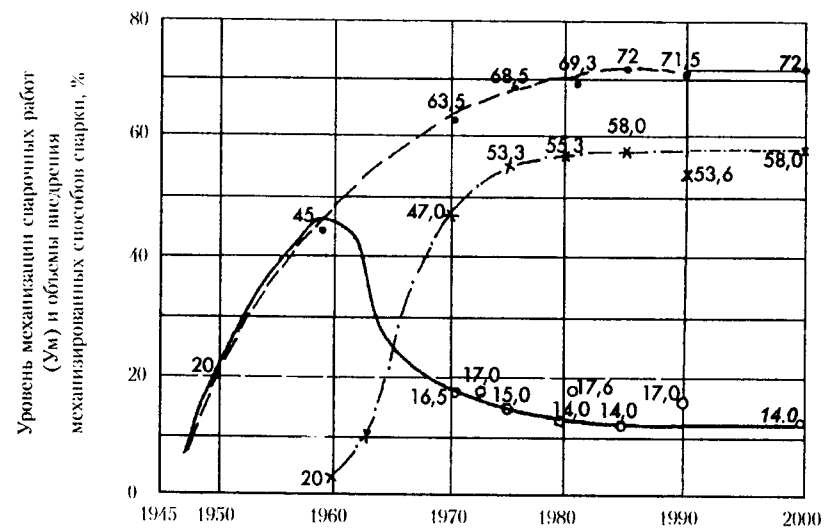


Рис. 1.2. Изменение объемов применения механизированных способов сварки в отечественном судостроении:

- o — сварка под флюсом; x — сварка в CO₂;
- — уровень механизации сварочных работ

увеличение точности вырезаемых деталей за счет уменьшения тепловой деформации кромок.

Большой вклад в разработку прогрессивных сварочных технологий, механизацию сварочных процессов, создание современного сварочного оборудования, сварочных и основных материалов для изготовления судовых конструкций внесли Центральный научно-исследовательский институт технологии судостроения (ЦНИИ ТС), Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов (ЦНИИ КМ) «Прометей», Институт электросварки им. Е. О. Патона (г. Киев).

1.2. МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ СВАРОЧНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Металлы характеризуются кристаллической решеткой, в которой атомы (ионы) занимают свои строго фиксированные места с определенным параметром решетки (который определяет систему геометрического взаимоположения частиц). Для большинства металлов параметр кристаллической решетки составляет $(3...5) \cdot 10^{-8}$ см. Это расстояние обычно представляет среднее расстояние между

частицами, которые колеблются около своего среднего положения. Размах этих колебаний зависит от температуры тела – с повышением температуры размах колебаний увеличивается. При этом увеличиваются параметры решетки, что в целом приводит к ослаблению взаимосвязи между частицами.

Наличие строгого порядка расположения узлов кристаллической решетки и их взаимодействие с полем подвижных обобществленных электронов определяют свойства твердого тела. Реальные металлы являются материалами поликристаллическими, состоящими из множества отдельных кристаллов, связанных в общее монолитное целое. Физические свойства таких тел (металлов), в частности его прочность, зависят от соотношения свойств зерен и межзеренных границ, величины исходного зерна металла.

Если рассматривать частицы, находящиеся на поверхности тела, то их взаимосвязи не взаимоуравновешены, как в его глубине, а имеют свободные связи и при определенных условиях могут присоединять к себе другие атомы (или молекулы), например адсорбировать на поверхности различные газы или вступать во взаимодействие с такими же поверхностными атомами другого твердого тела или газа.

Для установления такой связи между двумя металлическими телами необходимо их сблизить на расстояние, сопоставимое с параметром кристаллической решетки $(3...5) \cdot 10^{-8}$ см. Это можно осуществить двумя путями. Первый обеспечивает установление связи между двумя поверхностями двух одинаковых по составу металлов, когда они находятся в твердом состоянии (сварка давлением). Самые современные способы обработки металлических поверхностей (даже такие как хонингование) не обеспечивают сближение двух частей на расстояние $< 5 \cdot 10^{-8}$ см. Этого недостаточно для сближения, позволяющего установить надежные межчастичные связи. Такие связи устанавливаются лишь в отдельных, весьма немногочисленных точках соприкасающихся поверхностей. Наличие на поверхности адсорбированных газов, окисных пленок и других загрязнений также мешает установлению связей.

При сварке давлением необходимая степень сближения соединяемых частей происходит за счет пластической деформации в районе контакта (рис. 1.3). При сближении, таким образом, двух металлических частей необходимо преодоление энергетического барьера потенциальной энергии системы атомов поверхностного слоя, и только после этого может произойти сближение на расстояние, равное параметру кристаллической решетки, возникновение условий для взаимодействия электронных полей. Так образуется неразъемное соеди-

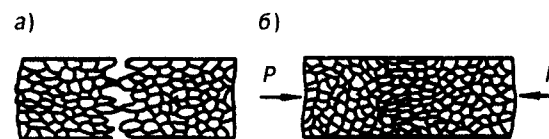


Рис. 1.3. Схема получения неразъемного соединения при приложении давления к двум металлическим телам:

а – до приложения давления;

б – после пластической деформации в плоскости соединения

нение. Если процесс образования соединения сопровождается диффузией частиц через образовавшуюся сращенную поверхность прорастанием через нее зерен и их перестройкой, то свойства соединения сближаются со свойствами исходных материалов.

Рассматриваемый способ соединения требует активации соединяемых поверхностей (что способствует удалению с них загрязнений). Энергия активации может сообщаться за счет нагрева (термическая активация) либо за счет упруго-пластической деформации.

При этом существует определенная связь между температурой и давлением. Дело в том, что нагрев металлического тела уменьшает сопротивление металла деформированию, что способствует перекристаллизации и ускоряет диффузионные процессы. Иначе, увеличение температуры способствует интенсификации процессов получения качественного сварного соединения. Подобная связь для чистого железа приведена на рис. 1.4.

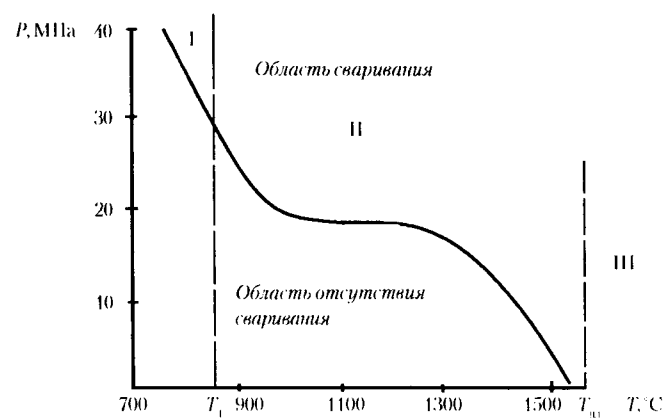


Рис. 1.4. Зависимость между температурой и давлением, необходимыми для сварки технического чистого железа

Кривая графика разделяет поле технологических параметров P и T на области получения равнопрочного сварного соединения, соединения с низкими свойствами и с полным отсутствием свариваемости. Если температура подогрева ниже температуры T_1 , то для получения сварного соединения требуются высокие, практически нереальные значения давлений (область ограниченной свариваемости I). Температурная область $T_1 - T_{пл}$ обеспечивает сварку при приложении внешней сдавливающей силы P (область II). По мере увеличения температуры необходимое для получения соединения давление уменьшается. Эта область представляет собой совокупность режимов *сварки давлением*. При увеличении температуры выше $T_{пл}$ соединение происходит и при $P=0$. Металл переходит в расплавленное состояние (область III), и соединение металлических частей происходит *сваркой плавлением*. При таком виде сварки две сближенные металлические детали расплавляются каким-либо источником тепла. Расплавившийся металл приближается к нерасплавившимся стенкам обеих деталей очень близко вследствие смачивания, он растекается по активированной нагревом поверхности твердых стенок, обеспечивая их соприкосновение и адгезию. При удалении источника нагрева жидкий металл охлаждается и затвердевает (кристаллизуется). Кристаллизация в первую очередь происходит у стенок, отводящих тепло; именно здесь между твердым металлом и закристаллизовавшимся слоем устанавливаются металлические связи. Здесь же между твердым и кристаллизующимся металлом могут протекать процессы диффузии. Такое соединение происходит без каких-либо признаков приложения внешнего давления. Любое сварное соединение, независимо от того, получено ли оно способами сварки давлением или плавлением, характеризуется непрерывной структурной связью.

1.3. СИСТЕМА КЛАССИФИКАЦИИ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

В основу классификационной схемы всех разновидностей сварочных процессов могут быть положены различные признаки. Наиболее распространенными являются:

- состояние металла в зоне сварки в момент ее осуществления;
- вид энергии, используемой для выполнения сварки.

В первом случае все способы сварки делятся на две крупные группы: сварка давлением и сварка плавлением. При сварке давлением сваривание деталей происходит с приложением давления, достаточного

для создания пластической деформации в контакте. Однако это лишь общее положение. При некоторых видах сварки давлением металл может расплавляться в зоне контакта с последующим обжатием. При всех способах сварки давлением тепловое воздействие на металл, как правило, значительно меньше, нежели при сварке плавлением, поэтому менее значительно изменение структуры и свойств основного металла рядом с местом соединения.

Способы сварки давлением имеют свою, часто ограниченную, область применения. Это объясняется необходимостью использовать большие давления и свойствами свариваемых металлов. Особое значение при сварке давлением имеет чистота свариваемых поверхностей, и зачастую недостаточно одной лишь предварительной зачистки места сварки, а требуется применение усложняющих технологию сварки приемов (травление, предохранение зачищенных поверхностей от образования окислов путем применения флюсов, защитных газов или вакуума). Для выполнения сварочных операций при сварке давлением в большинстве случаев изделие должно подаваться к машине.

При сварке плавлением металл в зоне соединения, как об этом было сказано выше, расплавляется каким-либо источником теплоты. Этот источник должен обладать достаточной мощностью для обеспечения локального расплавления металла; источник перемещается вдоль линии сварки, обеспечивая последовательное расплавление кромок металла от участка к участку. При этом с увеличением сечения свариваемых деталей не требуется применение громоздких сварочных машин. Расплавление металла практически всегда ведет за собой взаимодействие жидкого металла с окружающей воздушной средой посредством протекания металлургических реакций, что, как правило, приводит к ухудшению свойств закристаллизовавшегося металла. Появляется необходимость целенаправленного регулирования этих реакций и защиты расплавленного металла.

Классификация по виду энергии, используемой для выполнения сварки, предусматривает деление всех существующих видов сварки на следующие группы: механическая, химическая, электрическая, электромеханическая, химико-механическая.

В первой группе используются *механические* виды энергии (давление), которые вызывают пластическую деформацию металла в зоне сваривания. К ней относится холодная сварка, сварка взрывом, сварка трением.

При использовании *химической* энергии нагрев металла до его расплавления происходит за счет теплоты, возникающей при протекании химических реакций. Здесь не требуется затрат механической энергии. Примером может служить ацетилено-кислородная (газовая) сварка.

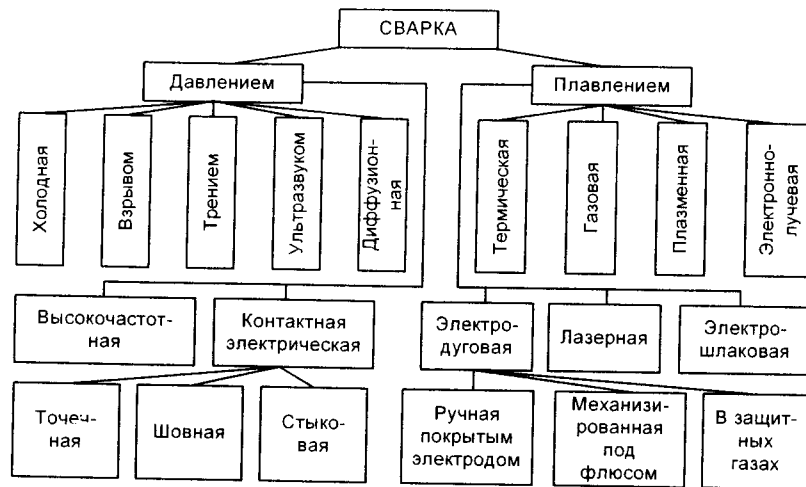


Рис. 1.5. Классификация основных способов сварки

Все *электрические* виды сварки основаны на превращении электрической энергии в тепловую. Это превращение может осуществляться различными путями: за счет сварочной дуги, протекания тока через расплавленный шлак, индукционирования тока различных частот, кинетической энергии пучка электронов либо квантов света. Эти способы имеют широкое распространение в промышленности (электродуговая сварка различных подвидов, электронно-лучевая сварка, лазерная сварка).

Электромеханические виды сварки основываются на нагреве металла для распрямления из-за превращения электрической энергии в тепловую с последующей пластической деформацией путем приложения внешних сил (электрическая контактная сварка различных разновидностей).

Химико-механические способы основаны на комбинированном воздействии теплоты (за счет химических реакций) с последующим приложением внешних сил для пластического деформирования (кузнечная, газопрессовая сварка). Один из вариантов упрощенной классификации по первому признаку предложен на схеме рис. 1.5.

2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ И ПЛАВЛЕНИЕМ

2.1. РАЗНОВИДНОСТИ СПОСОБОВ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ

Все способы сварки этим методом можно разделить на две группы. В первой сварка осуществляется без предварительного подогрева свариваемых деталей. Здесь происходит соединение в результате пластической деформации в районе контакта, и кратковременный, относительно небольшой по величине нагрев лишь сопутствует этой деформации.

Ко второй группе относятся способы, при которых объемы металла в районе контакта подвергаются значительному нагреву. Для некоторых разновидностей способов местный нагрев достигает $T_{нп}$ (электрическая контактная сварка).

Способы сварки без подогрева

Холодная сварка была предложена в 1942 г. академиком К. К. Хреновым. В этом способе в чистом виде реализуется принцип сварки давлением (рис. 2.1).

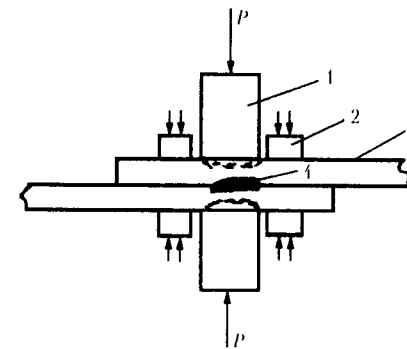


Рис. 2.1. Схема холодной сварки:

1 — пуансоны, создающие давление; 2 — прижимные шайбы;
3 — свариваемые листы; 4 — место соединения

При приложении давления P на поверхности листов в месте контакта происходит смятие гребешков поверхности металла за счет совместной пластической деформации деталей (ее величина может достигать до 80%). При этом происходит разрушение поверхностных окисных пленок, растет площадь чистых контактируемых поверхностей, они сближаются до величин межатомных расстояний, образуются межатомные связи и создается неразъемное соединение. Способ применим для относительно «мягких» (высокопластичных) металлов, таких как медь, алюминий и их сплавы, и служит для соединения проводов, шин и армирования деталей из одного металла другим и других надобностей.

Сварка взрывом разработана в СССР в 1946 г. академиком М. А. Лаврентьевым. При этом способе за счет сгорания заряда 2 на верхней пластине 3 образуется взрывная волна, «метающая» верхнюю пластину на нижнюю (рис. 2.2).

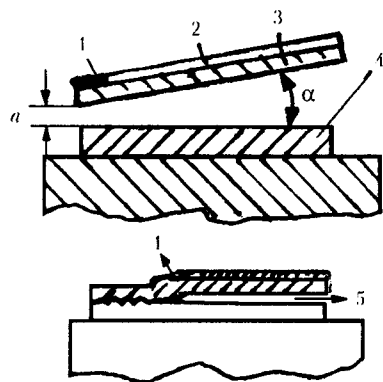


Рис. 2.2. Схема сварки взрывом:

- 1 — заплата; 2 — слой взрывчатого вещества; 3 — метаемая деталь;
4 — основная деталь; 5 — истечение воздушной струи во время взрыва

Энергия взрывчатого вещества (ВВ) затрачивается, с одной стороны, на совместную пластическую деформацию пластин, возникающую при ударе, а с другой стороны — на воздушную струю, с большой скоростью истекающую из зазора при «захлопывании» деталей. При пластической деформации возникает нагрев металла в месте контакта, облегчающий пластическую деформацию, которая и приводит к сближению деталей на необходимое расстояние. Воздушная струя в зазоре способствует удалению с поверхности деталей различных окис-

ных пленок, очищая их, приводя к получению качественного соединения. Технологическими параметрами способа является начальный зазор a , угол между пластинами α и величина навески ВВ Q . В качестве ВВ применяют специальную пластическую взрывчатку, наносимую слоем определенной толщины на поверхность метаемой детали. Все работы, связанные со взрывом, производят или в специальных камерах, или на полигонах. Применяется с успехом для нанесения на поверхность деталей слоев со специальными свойствами. Перспективен способ для получения плакированной листовой стали (нанесение на стальной лист тонкого слоя коррозионноустойчивой стали, алюминиевого или титанового сплава).

Ультразвуковая сварка разработана в 1935 г. в Германии. Детали сжимаются роликами, верхний из которых вращается и закреплен на коническом волноводе машины. Его противоположный торец соединен с магнитострикционным вибратором, обмотка которого питается от генератора с частотой более 20000 Гц. При достаточной мощности генератора возникающие в контакте электрод–металл поперечные колебания ультразвуковой частоты приводят к разрушению окислов, некоторому местному повышению температуры (в месте контакта деталей отмечается температура 250...300 °С). Трение разрушает пленки в месте контакта, благоприятствуя сближению свариваемых деталей на необходимое расстояние. Этот способ сварки применяется в приборостроении для сварки малых деталей с небольшими толщинами (менее 0,5 мм), а также для сварки полимерных пленок и некоторых пластмасс.

Способы сварки с подогревом

Кузнечная (горновая) сварка. Это первый вид сварки, примененный человеком около 3500 лет назад. При нем нагрев железных (стальных) деталей производят в горне, а соединение деталей происходит при прохождении пластической деформации, вызываемой проковкой. При правильном ведении процесса и полном вытеснении из стыка соединяемых деталей окислов железа, образующихся при нагреве, соединение обладает высоким качеством.

Электрическая контактная сварка. При этом способе сварки нагрев деталей в месте контакта и последующее получение соединения происходит за счет выделения тепла при прохождении электрического тока по цепи с различным сопротивлением в соответствии с законом Джоуля–Ленца

$$Q = I^2 R t,$$

где Q – количество выделенной теплоты, Дж; I – сила сварочного тока, А; R – сопротивление, Ом; t – время, с.

Общее (полное) сопротивление в районе сварки (рис. 2.3)

$$R = R_k + 2R_d + 2R_s,$$

где R_k , R_d , R_s – соответственно сопротивление в контакте, сопротивление детали и сопротивление электрод–деталь.

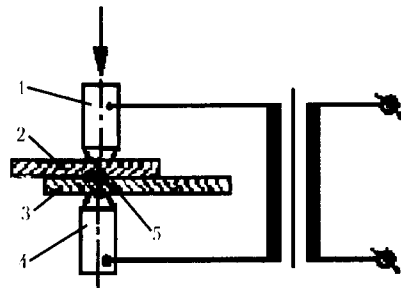


Рис. 2.3. Схема электрической контактной точечной сварки:

1, 4 – электроды; 2, 3 – заготовки; 5 – сварная точка

Обычно самым большим электрическим сопротивлением обладает место контакта подлежащих сварке поверхностей деталей. Именно здесь и выделяется наибольшее количество теплоты, идущей на нагрев и расплавление металла. Нагрев в машинах для контактной сварки обычно осуществляется переменным током, получаемым от силовых понижающих трансформаторов большой мощности (есть и машины постоянного тока). Теплота, выделяемая в контактах R_k , бесполезна и отводится бронзовыми водоохлаждаемыми электродами; величина этого сопротивления, как правило, невелика. Контактное сопротивление R_k , особенно в начальной стадии процесса, достаточно велико. Это объясняется тем, что контакт даже шлифованных свариваемых поверхностей осуществляется в отдельных точках, на малых площадках гребешков поверхности рельефа с учетом того, что любая поверхность покрыта пленкой окислов.

По мере прохождения тока уменьшается прочность металла в местах контакта из-за его нагрева, приложенное давление приводит к деформированию гребешков поверхности, разрушению окисных пленок, увеличению площади контакта и, как следствие, к уменьшению контактного сопротивления. При температуре примерно 500 °С сопротивление контакта R_k становится таким малым, что им можно

пренебречь, и основную роль начинает играть сопротивление свариваемых деталей R_d (это относится ко всем видам контактной сварки). Величина этого сопротивления изменяется с изменением температуры нагреваемых деталей, что следует учитывать при его расчете. Теплота в районе соединения распределяется в зависимости от вида контактной сварки.

На рис. 2.4 дано примерное распределение температур при *точечной* сварке. Центральная часть нагревается до температуры плавления или выше. Она и образует литое ядро точки после застывания. Размеры этого ядра зависят от толщины и рода материала свариваемых деталей, диаметра электрода и режима сварки. Точечная сварка позволяет получить прочное нахлесточное соединение (при определенном количестве точек на длине соединения); однако такое соединение негерметично.

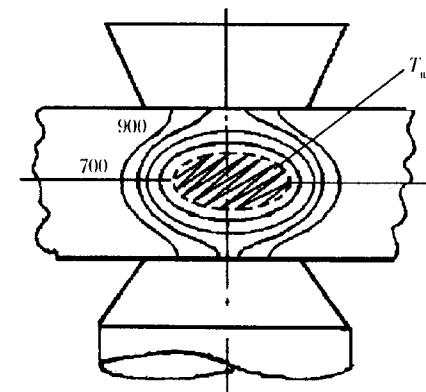


Рис. 2.4. Распределение температуры вокруг литого ядра точки

Для получения прочно-плотного соединения необходимо пользоваться *шовной* контактной сваркой (рис. 2.5). Здесь в качестве электродов используются медные диски (ролики), закрепленные на станине машины. К дискам подведен ток от трансформатора машины, при сварке они вращаются. Между ними помещаются свариваемые листы, диски прижимаются к ним. Сварочный ток подается импульсами. Время перерыва между импульсами t_{ii} выбирается с таким расчетом, чтобы одна точка (ее расплавленное ядро) перекрывала другую, образуя непрерывный шов, обеспечивающий как плотность, так и прочность соединения.

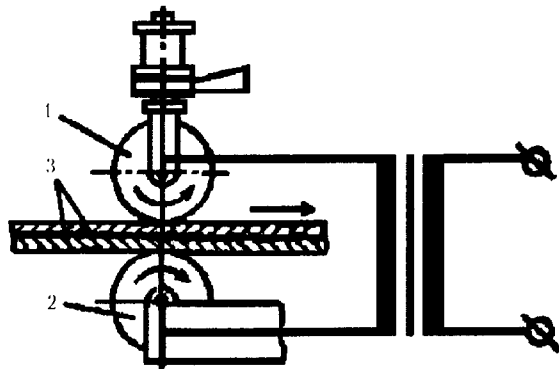


Рис. 2.5. Схема шовной электрической контактной сварки:

1, 2 – роликовые электроды; 3 – свариваемые детали

Операция по созданию давления на электродах, включение и выключение сварочного тока, подача давления и его снятие происходят в определенной последовательности в зависимости от разновидности контактной сварки. На рис. 2.6 показаны схематизированные циклограммы рассмотренных способов контактной сварки.

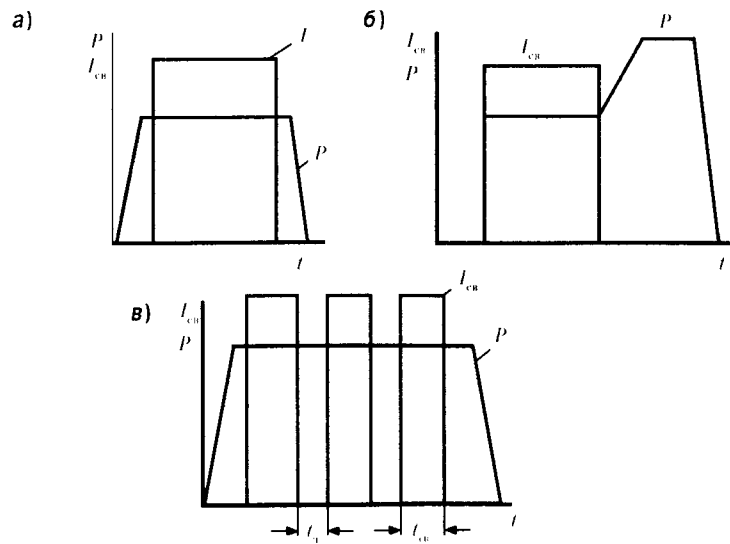


Рис. 2.6. Схематизированные циклограммы контактной сварки:

а – стыковая сварка; б – точечная сварка; в – роликовая сварка;
 P – давление; $I_{св}$ – сварочный ток

Как при точечной, так и при шовной сварке перед началом процесса поверхность свариваемых деталей в месте соединения тщательно зачищают механическим способом или подвергают химическому травлению. При назначении режимов необходимо учитывать шунтирование сварочного тока через уже сваренные точки либо места случайного касания деталей вне места сварки.

Ток шунтирования может быть определен из выражения

$$I_{ш} = I_{св} \frac{R_{св}}{R_{ш}}$$

где $I_{св}$ – сварочный ток, А; $R_{св}$ – сопротивление в месте сварки, Ом; $R_{ш}$ – сопротивление шунта, Ом. Эта величина зависит от расстояния между точками и может составлять 20...25% от сварочного тока.

Режимы при точечной и шовной сварке выбирают в зависимости от рода материала и толщины свариваемых деталей. Этими видами сварки хорошо свариваются малоуглеродистые и коррозионностойкие стали, алюминиевые и титановые сплавы в диапазоне толщин 0,5...5,0 мм. Режимы сварки подбираются опытным путем, и отдельные их параметры колеблются в пределах: сварочный ток 5...25 кА (для точечной сварки всех вышеуказанных материалов в диапазоне толщин 0,5...3,0 мм); давление на электрод 1...8 кН; диаметр контактной поверхности электрода 4,0...12,0 мм, длительность включения тока 0,1...0,4 с.

Шовная сварка при прочих равных условиях имеет несколько иные параметры. Так, сила сварочного тока изменяется в пределах 8...22 кА, усилие сжатия на роликах 2...14 кН, скорость сварки 0,5...2,0 м/мин, продолжительность включения тока и паузы 0,04/0,04...0,16/0,18 с.

Сварка деталей малой толщины (< 1,0 мм) ведется при небольших значениях давления P на так называемых «жестких» режимах, что увеличивает роль контактных сопротивлений, способствует концентрированному выделению теплоты в контакте. Здесь особенно важно стабилизировать силу тока, длительность его протекания и усилия давления.

При сварке деталей больших толщин ($\geq 5,0$ мм), имеющих значительную жесткость, необходимы высокие сварочные и ковочные усилия и относительно «мягкие» режимы по току. Ввиду перегрева и повышенного износа электродов здесь целесообразно использовать многоимпульсные режимы (чередование импульсов тока и пауз).

Стыковая контактная электрическая сварка (рис. 2.7) подразделяется на сварку сопротивлением и сварку оплавлением. В зажимах

машины устанавливаются две заготовки (как правило, имеющие сечение тел вращения), подлежащие сварке. Левый зажим машины неподвижен, правый – подвижный зажим – позволяет производить возвратно-поступательные перемещения. Зажимы (губки) подключены к вторичной обмотке сварочного трансформатора. При сварке сопротивлением цикл процесса начинается с перемещения правой заготовки до контакта со второй и создания давления с деталью левого зажима. После этого включается сварочный ток. За счет повышенного сопротивления в контакте R_k начинается разогрев и пластическая деформация металла в районе контакта. Под влиянием пластической деформации при действующем в цикле давлении металл деформируется, его части сближаются до расстояний, образующих металлические связи, часть металла вытесняется из зазора в виде так называемого грата.

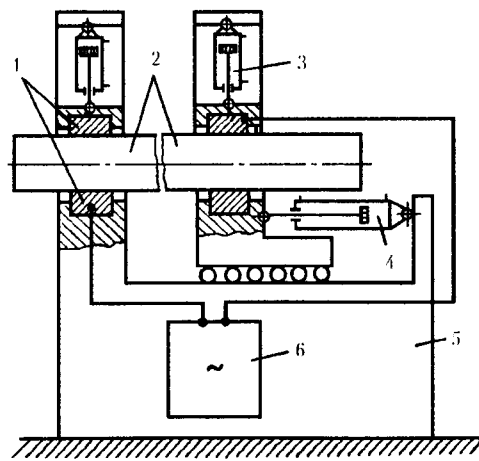


Рис. 2.7. Схема контактной стыковой сварки:

1 – прижимные губки; 2 – свариваемые детали;
3 – цилиндр пневматического прижима; 4 – цилиндр перемещения подвижных губок; 5 – станция машины; 6 – источник тока (трансформатор)

При сварке оплавлением подвижный зажим машины, при включении тока, после замыкания деталей отводится вправо с возбуждением дуги между деталями. После нескольких таких действий кромки деталей оплавляются, после чего выключается ток и дается осадка – образуется шов между деталями. Этот вид сварки целесообразно при-

менять для деталей с компактным сечением, преимущественно тел вращения (трубы, прутки).

При сварке сопротивлением торцы деталей необходимо тщательно зачищать и подгонять. Этот вид сварки применяется для деталей из одного материала с относительно небольшим контактным сечением. Сварка оплавлением имеет перед сваркой сопротивлением некоторые преимущества, что и определяет ее более широкое применение. К этим преимуществам относятся:

- отсутствие тщательной предварительной механической подготовки соединяемых поверхностей;
- возможность сварки развитых сечений;
- возможность сварки разнородных материалов;
- высокая прочность сварного соединения;
- увеличенная производительность.

К общим достоинствам электрической контактной сварки относятся: высокая производительность и возможность широкой автоматизации процесса при серийном и массовом производстве; весьма широкий спектр свариваемых материалов: малоуглеродистые, нержавеющие аустенитные стали, алюминиевые сплавы, медные и титановые сплавы. В судостроении стыковая контактная сварка применяется для: сварки инструмента, стальных труб судовых систем (диаметр 10,0...76,0 мм при толщине стенки 3,0...5,0 мм); приварки фланцев и наконечников к трубам; сварки встык полособульбов; сварки оплавлением при изготовлении отдельных звеньев якорных цепей.

Точечная и шовная сварки производятся на специальных машинах. Серийно выпускаемые машины имеют относительно небольшой вылет (400...600 мм), что объясняется большой потерей мощности в связи с увеличением индуктивного сопротивления вторичного контура. Это обстоятельство затрудняет сварку крупногабаритных конструкций; для них применяются переносные машины типа клещей. Такие аппараты можно использовать для сварки стальных переборок и выгородок, находящихся внутри корпуса судна.

В судостроении применяют клеесварные точечные соединения. В этом случае на предварительно очищенные поверхности наносят слой клея (грунтовка) толщиной 0,3...0,5 мм и не позднее чем через час детали сваривают точечной сваркой. Применяют специальный клей, например КС-609. Через 3...4 часа после сварки происходит полимеризация (отвердевание) клеевой прослойки, обеспечивающая получение герметичного соединения, в то время как обычное точечное соединение герметичности не дает.

Стационарные машины для контактной сварки состоят (независимо от марки) обычно из двух частей:

- механической (корпус, станина), служащей для размещения узлов (зажимного устройства, устройства для создания сварочного давления и т. д.);
- электрической, включающей силовой сварочный трансформатор, регулятор сварочного тока, реле времени, выключателя тока и т. д.

На точечных и шовных машинах зажим деталей осуществляется механизмом сжатия деталей; зажимное устройство стыковых машин состоит из губок и механизма зажима. Механизм зажима может быть механическим (винтовым, эксцентриковым), пневматическим или гидравлическим. Механизм сжатия обеспечивает необходимый контакт между свариваемыми деталями, что необходимо для протекания тока и сдавливания деталей в завершающей стадии процесса. Этот механизм может быть рычажный (педальный), на более мощных машинах – пневматический, гидравлический или пневмогидравлический.

В качестве силовых трансформаторов контактных машин используются однофазные понижающие трансформаторы с переменным напряжением 220 и 380 В. Вторичная обмотка такого трансформатора обычно состоит из одного (двух) витков с напряжением холостого хода 1...12 В. Сила тока вторичной цепи достигает десятка тысяч ампер. В мощных современных машинах применяются трехфазные трансформаторы; сила тока во вторичной цепи в этом случае достигает сотен тысяч ампер. Трансформаторы контактных машин работают в режиме чередования периода нагрузки с паузами (цикл повторно-кратковременного режима). Продолжительность включения (ПВ) для стыковых и точечных машин должна быть не менее 20%, для шовных – не менее 40%. Мощность серийных контактных машин при ПВ до 25% составляет 5...150 кВт; в специализированных машинах для сварки больших сечений доходит до 300...400 кВт.

Диффузионная сварка (1953 г., профессор Н. Ф. Казаков) выполняется в специальной установке (рис. 2.8), в объеме которой поддерживается вакуум $\approx 1,33 \cdot 10^{-2}$ Па. Детали, подлежащие сварке, заранее загружаются в установку, затем создается вакуум. Детали нагреваются индуктором (температура нагрева зависит от материала свариваемых деталей) и обжимаются при помощи устройства. Время выдержки при данной температуре обычно составляет 3...6 мин, давление находится в пределах 2...40 МПа. При нагреве в вакууме металл практически не окисляется; при сжатии нагретого металла за счет пласти-

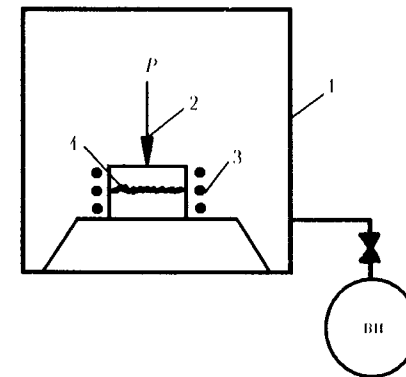


Рис. 2.8. Схема диффузионной сварки:

1 – корпус камеры; 2 – усилие сжатия;

3 – индуктор для нагрева деталей; 4 – свариваемые детали; ВН – вакуумный насос

ческой деформации происходит деформация поверхностного рельефа на плоскостях контакта, высокая температура и относительно длительная выдержка приводят к развитию диффузионных процессов между двумя деталями, растворению и коагуляции неметаллических включений. Незначительная величина пластической деформации в контакте позволяет получать сварные узлы высокой точности. Эта разновидность сварки позволяет сваривать стали всех классов со многими цветными и химически активными металлами. Находит применение в машиностроении и энергомашиностроении для сварки арматуры, деталей двигателей и турбин в приборостроении и других областях.

При **сварке трением** (СССР, 1956 г.) механическая энергия за счет трения между торцами неподвижной и вращающейся деталей (рис. 2.9) превращается в теплоту, которая и разогревает металл до температуры сварки, после чего выключается вращение и дается осадка.

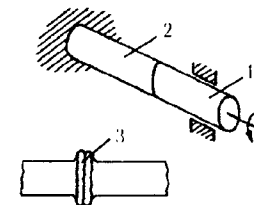


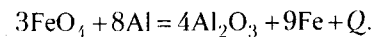
Рис. 2.9. Схема сварки трением:

1, 2 – свариваемые детали; 3 – образовавшийся шов

Этим способом хорошо свариваются детали, имеющие форму тел вращения из стали, стали с алюминием и медью. Часто применяется в инструментальном производстве.

2.2. СПОСОБЫ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

Термическая сварка (Н. Н. Бекетов, 1865 г.) основана на восстановлении металла из окисла с помощью другого, химически активного металла. Для сварки обычно используют смесь порошков окислов железа (окалина) и алюминия. Смесь поджигается, и начинается реакция с выделением теплоты:



При сгорании 1 кг смеси выделяется 3100 кДж теплоты (экзотермическая реакция), которая нагревает восстановленное железо выше $T_{\text{пл}}$ (до 2200...2400 °С). Принципиальная схема варианта сварки плавлением показана на рис. 2.10.

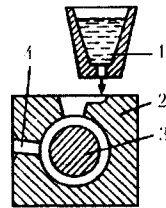
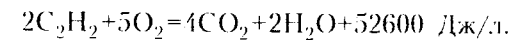


Рис. 2.10. Термитная сварка плавлением:

1 - термитный присадочный материал; 2 - форма; 3 - изделие;
4 - отверстие для предварительного подогрева

Расплавленный в тигле перегретый металл поступает в зазор заформованных деталей и, подплавляя их кромки, образует соединение. В настоящее время способ наиболее широко применяется для сварки рельс (трамвайных). Однако в ряде случаев может быть использован и для других целей (например, для сварки тросов, электропроводящих шин и наплавки).

При **газовой (ацетилено-кислородной) сварке** теплота, идущая на нагрев и расплавление металла, получается за счет экзотермической реакции сгорания ацетилена в кислороде:



Для сварки используются специальные горелки, у которых в смешительной камере происходит смешивание кислорода и ацетилена, подаваемых туда в регулируемых количествах. Из мундштука горелки (рис. 2.11) истекает смесь, которая после поджига образует пламя, имеющее по своей оси определенное температурное распределение. Максимальное значение температуры в средней части пламени (его ядра) достигает 3200 °С, что достаточно для проведения с металлом различных технологических операций.

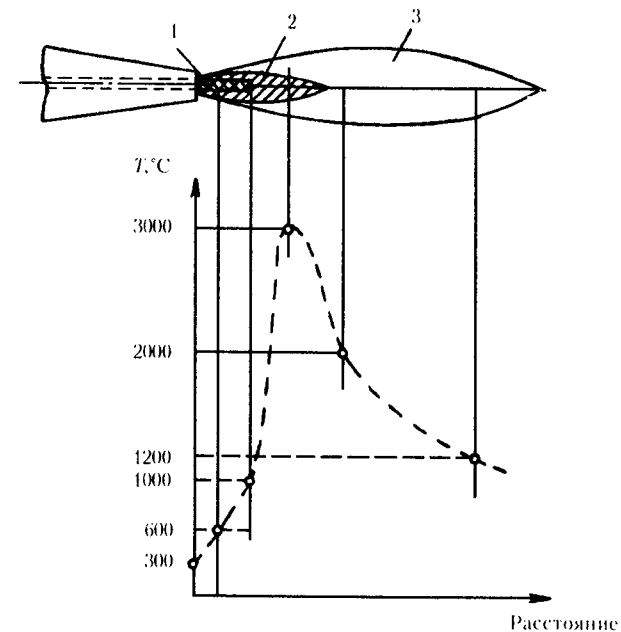


Рис. 2.11. Строение газо-кислородного пламени и график распределения температур по его оси:

1 - ядро; 2 - средняя зона; 3 - факел

Химический состав пламени и его воздействие на расплавленный металл зависят от соотношения в нем $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2$. Так, при $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2 > 1$ пламя называют окислительным, здесь в средней зоне появляется свободный O_2 и CO_2 , смесь теряет свои восстановительные свойства.

При $O_2/C_2H_2 < 1$ в средней зоне пламени может образовываться свободный углерод, что в ряде случаев может приводить к науглероживанию металла шва и появлению в нем трещин. Это восстановительное или науглероживающее пламя. При $O_2/C_2H_2 = 1$ пламя называют нейтральным.

При сварке этим способом из-за специфики пламени распределение теплоты в металле (широкая полоса нагрева и длительное пребывание металла в районе температур 1100...1500 °С) приводит к повышенным сварочным деформациям и появлению крупнозернистой структуры перегрева металла в зоне рядом со швом.

Пламенем газовой горелки могут осуществляться следующие технологические процессы:

- соединительные (сварка, пайка);
- разделительные (резка);
- напыление поверхностных слоев – металлизация;
- технологические нагревы (закалка, правка, строжка).

Наиболее широкое распространение получили сварка и разделительная резка.

При газовой сварке мощность газового пламени выбирают в зависимости от марки свариваемого материала и его толщины. Мощность зависит от количества подаваемого горючего и регулируется диаметром внутреннего канала наконечника (его номером).

Примерный расход ацетилена на 1 мм толщины металла составляет:

- для сварки малоуглеродистой стали 100...150 л/ч;
- для сварки меди 150...200 л/ч;
- для сварки алюминия 75...100 л/ч.

Регулировка пламени (O_2/C_2H_2):

- для сварки стали – 1,15;
- для сварки меди и алюминия – 1,05;
- для сварки латуни – 1,3...1,4

При газовой сварке часто используют флюсы, которые предназначены для очистки поверхности металла от окислений (особенно это относится к металлам с большим сродством к кислороду). Флюсы (в зависимости от их состава) могут либо химически связывать окислы, либо физически растворять их в шлаке.

Небольшая мощность газового пламени и невысокая его температура, возможность регулирования интенсивности нагрева делают его рациональным для сварки относительно малых толщин и сечений, обычно это 2,0 мм и ниже (вентиляционные трубы, тонкостенные сосуды, легкие выгородки, дельные вещи, трубы и пр.). Широкая зона нагрева способствует применению этого способа для сварки цветных метал-

лов (меди, алюминия и их сплавов), обладающих высокой теплопроводностью. Эти же свойства газового пламени способствуют применению его для других технологических надобностей. Одними из них являются технологические нагревы для правки деформированных при сварке тонколистовых конструкций. Процесс заключается в нагревах (пятнами или полосами) определенных мест деформированной конструкции в интервале температур 400...800 °С. Возникающие при нагреве пластические деформации металла приводят при дальнейшем его охлаждении к укорочению нагретых участков и возникновению в них растягивающих напряжений. Технология правки заключается в быстром концентрированном нагреве заранее выбранных мест конструкции; часто после нагрева требуется быстрое охлаждение, которое осуществляют водой. К недостаткам способа относятся трудность контроля температур нагрева и возможность подплавления нагреваемой поверхности ядром пламени (что особенно недопустимо для сталей повышенной прочности). В случае невозможности общей термической обработки (большие габариты конструкции) иногда проводят местную термообработку сварных швов, осуществляя нагрев сварных соединений пламенем газовой горелки.

Большое распространение получила кислородная резка (в настоящее время она вытесняется плазменной резкой). При этом способе разделение металла основано на его нагреве до температуры воспламенения теплотой газового пламени и последующей экзотермической реакцией окисления металла с удалением образовавшихся окислов кинетической энергией струи режущего кислорода. На поверхности реза остаются линии, так называемые отставания, представляющие собой чередующиеся выступы и впадины глубиной в десятые доли миллиметра. Для резки применяются специальные горелки (резачки), конструкция которых отличается от газовых горелок, применяемых для сварки, тем, что сопло их, кроме цилиндрического кольцевого канала подачи ацетилено-кислородной смеси для образования подогревающего пламени, имеет центральное отверстие для подачи так называемого режущего кислорода.

При резке сначала поджигают смесь и производят подогрев места начала резки, затем включают режущий кислород и производят резку, которая идет за счет сгорания металла в месте подогрева. Резка может производиться как вручную, так и на специальных машинах с цифровым или программным управлением.

Кислородной резке хорошо подвергаются стали перлитного класса и титановые сплавы. У этих металлов температура плавления выше температуры интенсивного окисления в кислороде. Образующиеся

на кромках окислы при резке сталей (при выполнении разделки кромок под сварку) зачищаются металлической щеткой. Детали из титанового сплава, подготовленные под сварку кислородной резкой, должны подвергаться дополнительной механической обработке. Это связано с высокой химической активностью титана и образованием при кислородной резке на торцах кромок реза слоя, насыщенного кислородом (его глубина составляет 1,0...1,5 мм). Этот слой имеет высокую твердость и покрыт мелкими трещинами. Кислородная резка широко применяется для вырезки деталей из материала толщиной 4,0...40,0 мм. При резке листового материала (особенно малых и средних толщин) возникают тепловые деформации, искажающие заданные размеры детали и уменьшающие точность вырезанных деталей.

Электродуговая сварка плавлением.

Ручная дуговая сварка металлическим электродом с покрытием. Сварочная дуга является одним из самых распространенных и универсальных источников теплоты. Ручная сварка покрытым электродом широко распространена в промышленности – несмотря на достаточно невысокую производительность, она обладает рядом несомненных преимуществ (универсальность, возможность выполнения швов в труднодоступных местах, различных пространственных положениях и т. д.). Схема процесса приведена на рис. 2.12.

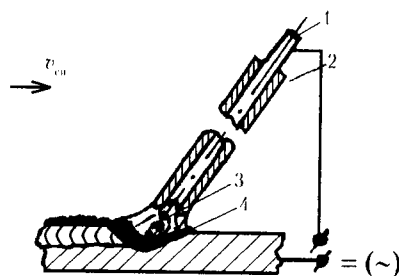


Рис. 2.12. Схема ручной электродуговой сварки покрытым электродом:

- 1 – металлический стержень;
- 2 – неметаллическое электродное покрытие;
- 3 – сварочная дуга; 4 – ванна расплавленного металла

Источник сварочного (постоянного или переменного) тока подключен к электроду и свариваемому изделию. После зажигания дуги за счет теплоты, выделяемой ею, происходит расплавление металла соединяемых деталей и электродного стержня. При перемещении

электрода образуется сварной шов, металл которого кристаллизуется по мере удаления дуги и падения температуры металла. Одновременно (или с небольшим запазданием) с металлическим стержнем плавится и покрытие. При плавлении покрытия образуется газовая фаза (СО) и расплавленный шлак. Угарный газ оттесняет воздух из реакционной зоны, а шлак окутывает расплавленные капли и покрывает слоем расплавленный металл сварочной ванны и кристаллизующийся металл. В этом заключается одна из важнейших задач покрытия – создание шлако-газовой защиты жидкого и остывающего металла.

В случае применения в качестве электрода голой проволоки происходит насыщение жидкого металла сварочной ванны кислородом и азотом из воздуха. В результате взаимодействия металла с кислородом образуется закись – окись железа (Fe_3O_4); она располагается по границам зерен закристаллизовавшегося металла шва, ослабляет связь между ними и приводит к падению прочности и пластичности металла шва.

Азот из воздуха, растворяясь в жидком металле, образует хрупкие нитриды, что увеличивает прочность и уменьшает пластичность металла (охлаждает его).

Основными параметрами режима являются: диаметр электрода d , сила тока $I_{св}$, напряжение на дуге U_d и скорость сварки $v_{св}$. Глубина и форма проплавления металла зависят от параметров режима сварки. Так, глубина проплавления прямо связана с диаметром электрода и силой тока, пространственным положением, скоростью сварки и траекторией ведения торца электрода. Длина дуги сказывается на ширине шва (чем она длиннее, тем больше ширина шва). Эти же параметры режима в конечном итоге отвечают за все параметры проплавления. Для ручной сварки характерны следующие размеры сварочной ванны: глубина проплавления до 8,0 мм, ширина 8,0...15,0 мм, длина 10...30 мм. Металл шва в своем составе может содержать 15...35 % основного металла.

Оптимальный выбор параметров режима очень важен, так как он определяет получение сварных швов высокого качества. Основным параметром режима ручной сварки является сила тока, которая выбирается в зависимости от диаметра электрода. Именно эти два параметра наряду с маркой электрода указываются в технологическом процессе. Информацию о других параметрах можно получить из паспорта электродов данной марки. Ручная сварка позволяет производить работы во всех пространственных положениях (рис. 2.13) – нижнем, вертикальном и потолочном.

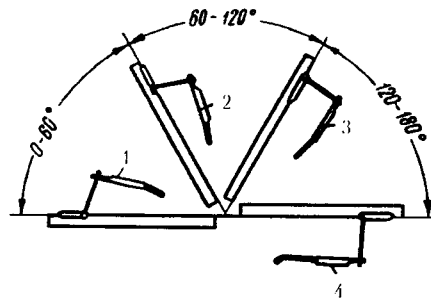


Рис. 2.13. Пространственные положения при ручной сварке:
1 — нижнее; 2, 3 — вертикальное; 4 — потолочное

Техника сварки в каждом из положений имеет свои особенности. В нижнем положении создаются наиболее благоприятные условия для формирования шва высокого качества. Стыковые соединения выполняются без разделки кромок с одной или обеих сторон с толщиной до 6,0 мм. С увеличением свариваемой толщины применяется разделка кромок, которая может выполняться с одной или с двух сторон (рис. 2.14). Стыковые сварные соединения могут выполняться на весу, на различного рода подкладках и с подваркой корня шва. Последнее время широко распространена сварка монтажных соединений на керамических удаляемых подкладках, которые можно использовать многократно. При многослойной сварке они могут применяться при выполнении первого (корневого) прохода. В этом случае может использоваться подварка корня шва или удаление непровара в корне шва с помощью газоэлектрической строжки с последующей подваркой.

Техника сварки в вертикальном и потолочном положении имеет свою специфику. Она требует:

- повышенной квалификации сварщика;
- уменьшения силы тока по сравнению с нижним положением на 10...20% для уменьшения объема ванны расплавленного металла с целью предотвращения его стекания;
- применения электродов уменьшенного диаметра (для вертикальных швов не более 5,0 мм, для потолочных — не более 4,0 мм);
- ведения процесса на возможно короткой дуге с небольшими поперечными колебаниями.

Наиболее сложна сварка в потолочном положении; ее выполняют периодическими короткими замыканиями конца электрода на сварочную ванну. При этом положении ухудшаются условия вывода из

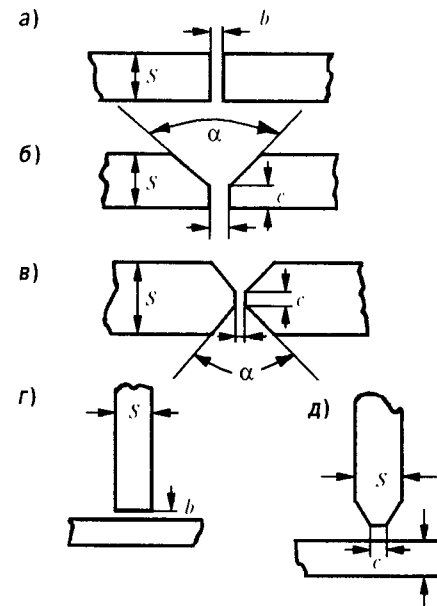


Рис. 2.14. Конструктивные элементы разделки кромок и сборки кромок под сварку:

- a* — стыковое без разделки кромок (толщины до 4,0 мм);
- б, в* — одно- и двухсторонняя симметричная разделка кромок (толщины > 5,0 мм);
- г, д* — тавровое соединение без и с разделкой обеих кромок;
- b* — зазор (обычно равен 1,5...2,0 мм);
- α* — угол разделки кромок (стандартный угол $60 \pm 5^\circ$);
- c* — приуглубление (обычно колеблется 2 ± 1 мм)

ванны шлака и газа, что отрицательно сказывается на качестве сварного шва.

В корпусе судна угловые швы весьма многочисленны. Они могут выполняться двумя приемами. Первый: сварка вертикальным электродом в лодочку. Здесь благоприятны условия для провара корня шва и формирования его усиления. Однако он требует тщательной сборки с соблюдением минимальных зазоров во избежание вытекания расплавленного металла. При втором приеме стенка тавра расположена вертикально, и сварка ведется наклонным электродом. Здесь трудно обеспечить провар шва по нижней плоскости (из-за натекания на нее расплавленного металла) и предупредить образование подрезов на вертикальной плоскости (из-за стекания с нее расплавленного метал-

ла). Это приводит к ограничению катета шва до 6,0...8,0 мм. При наклонном электроде трудно обеспечить глубокий провар корня шва, поэтому при увеличении толщин элементов соединения больше 4,0 мм делают односторонний, а при толщине свыше 12,0 мм – двухсторонний скос кромок (это обеспечивает полный провар сечения).

Наиболее сложна сварка вертикальных, горизонтальных и потолочных швов из-за трудностей удержания ванны от стекания. Вертикальные швы выполняются на подъем, на спуск (первый способ предпочтительнее). При сварке в горизонтальном положении из-за стекания металла возможно образование подрезов по верхней кромке. Поэтому при сварке металла большой толщины делают скос лишь верхней кромки. Наиболее затруднена сварка угловых швов в потолочном положении. Выполнение швов в этом положении требует специальной подготовки сварщика. Поэтому сварку в потолочном положении желательно по возможности избегать.

Одним из недостатков ручной сварки покрытым электродом является относительно низкая производительность. Это связано с тем, что применяемые электроды имеют предел по диаметру. Применение электродов диаметром более 8,0 мм настолько увеличивает массу электрода и держателя, что делает работу сварщика неэффективной из-за его быстрой утомляемости.

В свое время был предложен ряд способов, увеличивающих производительность ручной сварки. Одним из них является сварка лежащим электродом (рис. 2.15).

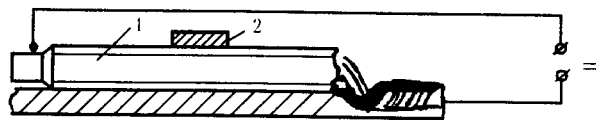


Рис. 2.15. Сварка лежащим электродом:
1 – электрод; 2 – медный прижимной банник

Для него изготавливается специальный электрод (он имеет большую длину и толщину покрытия, чем обычный). Электрод укладывается на свариваемый стык и прижимается к нему одним или несколькими медными брусками. После подключения к сварочной цепи зажигается сварочная дуга, которая по мере плавления электрода продвигается по стыку. Возможен вариант, когда из нескольких электродов, соединенных последовательно, собирается секция (по длине всего свариваемого стыка). По мере окончания плавления одного электро-

да специальная электрическая схема переключает ток на следующий электрод, обеспечивая непрерывное горение дуги по всей длине стыка. Рассмотренный способ в определенной мере механизмирует сварочный процесс. К нему же относится и сварка наклонным электродом.

Иногда для увеличения производительности процесса применяют электроды, содержащие в покрытии железный порошок (из-за большого объема сварочной ванны сварка возможна только в нижнем положении). При оценке технологии ручной сварки той или иной конструкции важными становятся количественные характеристики процесса плавления электрода. С учетом малой плотности тока (10...12 А/мм²) на производительность расплавления электрода, как это установил В. П. Вологдин, из всех параметров сварки решающее влияние имеет сила тока. Процесс плавления электрода определяется коэффициентом расплавления

$$\alpha_p = 3600 \frac{G_p}{I_{св} t} \text{ [г/А·ч]},$$

где G_p – масса расплавленного металла, г; $I_{св}$ – сила сварочного тока, А; t – время горения, с.

Возможность увеличения силы тока при ручной сварке ограничена. Во время сварки весь стержень электрода (450 мм) находится под током, что вызывает его нагрев джоулевым теплом. Если величина этого нагрева будет чрезмерна, то отдельные компоненты покрытия могут выгорать, покрытие может трескаться, электрод плавиться неравномерно. Поэтому ограничивается температура нагрева стержня для органических покрытий величиной 400 °С, а неорганических – 700 °С, что автоматически ограничивает плотность тока. Это и приводит к тому, что коэффициент расплавления при ручной сварке изменяется мало ($\alpha_p = 7...12$ г/А·ч).

Подводная сварка мокрым способом может осуществляться с применением покрытых электродов ручным способом. Этот вид сварки имеет свою специфику. При горении под водой дуга существует в пульсирующем парогазовом пузыре, образующемся за счет разложения молекул воды, испарения металла и компонентов покрытия, происходящих с учетом высокой температуры самой дуги. Процесс дуговой сварки в водной среде связан с двумя трудностями, возникающими именно из-за специфики окружающей среды. Первой

является высокое содержание водорода в парогазовом пузыре, образующегося за счет диссоциации молекул воды (до 70...80%).

Растворение водорода в сварочной ванне предопределяет априори высокое его содержание в металле шва (до 23...25 см³/100 г), что значительно превышает содержание водорода в металле шва при сухой сварке и чревато опасностью образования холодных трещин.

Второй трудностью являются повышенные скорости охлаждения металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ), что, особенно при сварке конструкций из сталей повышенной прочности, может приводить к подкалке металла этих зон сварного соединения и способствовать образованию холодных трещин.

Меры борьбы с этими неблагоприятными факторами немногочисленны. Практически не удается в значительной степени уменьшить содержание водорода в газовой фазе парогазового пузыря. Добавлением в покрытие веществ, содержащих фтор, возможно связать часть водорода в соединение HF, нерастворимое в металле, но хорошо растворимое в воде. Этим приемом удается уменьшить содержание водорода в металле шва до 14...15 см³/100 г. Этого тоже много, но для низкоуглеродистых и низколегированных сталей с хорошей пластичностью можно получить сварные соединения при применении перлитных электродов без холодных трещин. С увеличением прочности стали получить бездефектное соединение на конструкциях из этих сталей с применением перлитных электродов не удается и приходится применять электроды со стержнем из аустенитных сталей или никелевых сплавов. Это связано с тем, что предел растворимости водорода в аустенитном металле шва гораздо выше, чем у перлитного металла, а растворимый в твердом растворе аустенитного металла шва водород предотвращает (или значительно уменьшает) возможность возникновения холодных трещин в металле шва.

Уменьшение скоростей охлаждения металла шва и ЗТВ при сварке более прочных сталей, чем низколегированные, типа 09Г2 (с углеродным эквивалентом $C_{\Sigma} \geq 0,4$), можно получить двумя путями. Первый – увеличение коэффициента массы покрытия (увеличение толщины покрытия) с тем, чтобы увеличить массу жидкого шлака, укрывающего шов при остывании. Здесь также приходится прибегать к специальным приемам, так как увеличение толщины покрытия приводит к запаздыванию его плавления, образованию длинного козырька и нарушению процесса сварки. Из этого затруднения можно выйти, добавляя в покрытие титанотермитную смесь, которая при прохождении экзотермической реакции дает добавочное количество тепла, что ускоряет плавление покрытия.

Вторым путем является создание покрытий на каучуковой основе с добавкой титанотермитных смесей. Такие покрытия имеют хорошую адгезию в присутствии воды. Они наносятся на поверхности металла непосредственно у шва под водой перед выполнением сварки. Из-за низкой теплопроводности такого слоя затрудняется отвод от поверхности металла ЗТВ, а это в свою очередь ведет к уменьшению скоростей охлаждения металла ЗТВ, чему также способствует экзотермическая реакция, идущая с выделением тепла в части слоя непосредственно у сбега усиления к основному металлу. Этот способ позволяет применять ручную электродуговую сварку, выполняемую водолазами, при ремонте корпусов судов и других морских конструкций на глубинах до 50 м без постановки судна в док или осушения ремонтируемого района.

Механизированная сварка под слоем флюса (рис. 2.16). Электрическая дуга горит под слоем флюса. При ее горении происходит плавление подаваемой в зону горения электродной проволоки и флюса. Образуется парогазовый пузырь (он заполнен парами металла и газами, образующимися при плавлении проволоки и флюса).

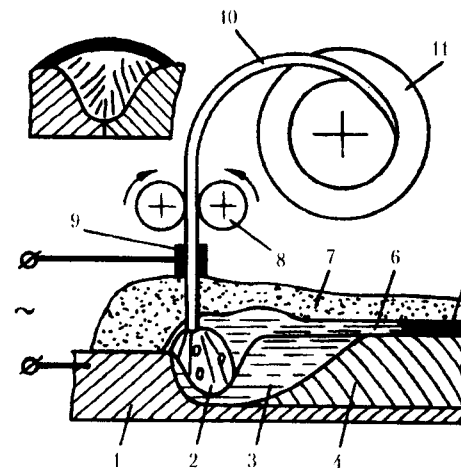


Рис. 2.16. Схема процесса механизированной (автоматической) сварки под флюсом:

- 1 – свариваемый металл; 2 – сварочная дуга; 3 – сварочная ванна;
- 4 – закристаллизовавшийся шов; 5 – застывшая шлаковая корка;
- 6 – жидкий шлак; 7 – насыщенный слой флюса; 8 – ролики, подающие в зону дуги электродную проволоку; 9 – токоподвод;
- 10 – электродная проволока; 11 – кассета с проволокой

Давление газов в этом пузыре ($7...9 \text{ г/см}^2$) совместно с давлением дуги оттесняет жидкий металл в хвостовую часть ванны; повышенные силы тока при этом способе увеличивают механическое давление дуги, что приводит к более глубокому проплавлению металла. Насыпной слой флюса и шлак надежно защищают реакционное пространство и затвердевающий металл от воздействия газов атмосферы.

Этот способ сварки имеет широкое распространение в промышленности и применяется для сварки и наплавки различных по своим свойствам металлических материалов. Он обладает высокой производительностью, обеспечивает высокое качество шва и стабильность свойств сварного соединения, обладая более низким (по сравнению с ручной сваркой) расходом сварочных материалов и электроэнергии.

Высокая производительность процесса достигается возможностью использовать более высокую плотность тока ($200...250 \text{ А/мм}^2$), что обеспечивается значительно меньшим вылетом электродной проволоки по сравнению с ручной сваркой ($h \leq 70 \text{ мм}$). Токсовая нагрузка на соответствующий диаметр электрода может достигать до 2000 А . Именно это ведет к увеличению глубины проплавления основного металла и скорости плавления электродной проволоки. Наибольшее распространение получила сварка одной электродной проволокой, хотя существуют варианты двух- и многодуговой сварки. Во всех видах механизированной сварки электродная проволока в зону дуги подается специальным механизмом подачи; при автоматической сварке дуга вдоль шва перемещается также при помощи механизма перемещения, а при полуавтоматической ее перемещает сварщик-оператор.

Сварка под флюсом может осуществляться как на постоянном, так и на переменном токе.

Основными параметрами автоматической сварки являются: диаметр электродной проволоки $d_{\text{э}}$ [мм]; сила сварочного тока $I_{\text{св}}$ [А]; напряжение на дуге $U_{\text{д}}$ [В]; скорость сварки $v_{\text{св}}$ [м/ч]. Критерием стабильности процесса автоматической сварки является равенство $U_{\text{пл}} = U_{\text{под}}$ (равенство скорости плавления и скорости подачи электродной проволоки). Рассматривая этот критерий с общих позиций, следует отметить, что $v_{\text{пл}} = f(q)$, где $q = \eta_{\text{д}} I_{\text{св}} U_{\text{д}}$.

Параметры режима сварки определяют основные параметры проплавления ($h_{\text{пр}}$ – глубину провара, g – высоту усиления и e – ширину шва), качественная взаимосвязь которых показана на рис. 2.17.

Недостатками сварки под флюсом является то, что из-за сыпучести флюса она может выполняться практически только в нижнем по-

ложении (наклон к горизонтальной плоскости не более 15°), а также затруднена уборка флюса после сварки (для этого применяются специальные флюсоотсосы).

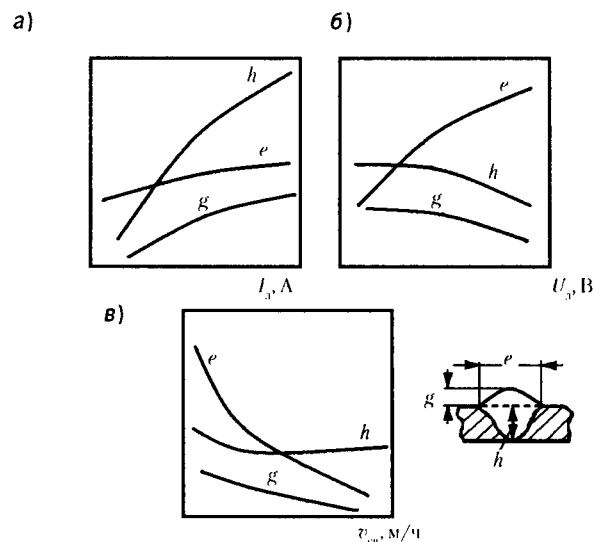


Рис. 2.17. Влияние на параметры проплавления металла основных параметров режима автоматической сварки под флюсом:

a – силы тока; b – напряжения на дуге; v – скорости сварки

Высокие значения силы тока и концентрации тепловой энергии позволяют при этом способе сварки значительно (по сравнению с ручной сваркой) увеличить толщину стыковых сварных соединений, выполняемых за один проход без разделки кромок (до 24 мм). При этом особое внимание необходимо обращать на формирование корня шва (обратного усиления), для качественного выполнения которого рекомендуется несколько способов (рис. 2.18).

Из-за большого объема жидкого металла ванны сварка на весу практически невыполнима. Самый простой, но отнюдь не самый хороший способ – сварка на остающейся подкладке (рис. 2.18, a), так как зазор между планкой и изделием является концентратором напряжений, местом концентрации солей (при работе в коррозионной среде) и возникновения щелевой коррозии. Одно время для сварки плоских конструкций толщиной $4,0...6,0 \text{ мм}$ рекомендовалось применять электромагнитные стелды с флюсовой подушкой (рис. 2.18, b). Для каче-

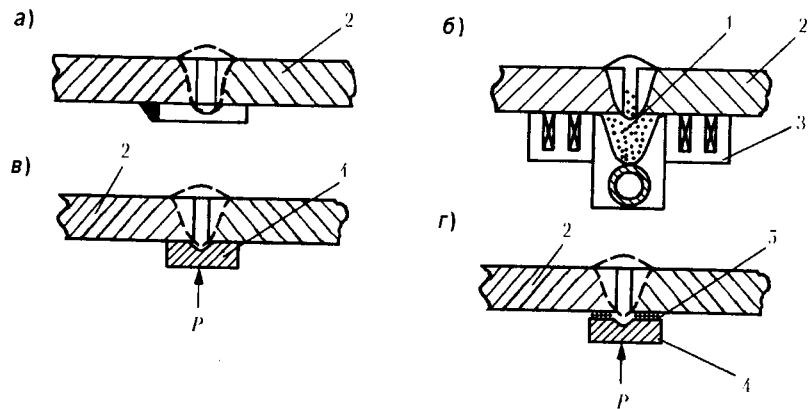


Рис. 2.18. Способы односторонней автоматической сварки стыковых соединений без разделки кромок:
a — на остающейся подкладке; *б* — на флюсовой подушке;
в — на медной подкладке; *г* — на флюсо-медной подкладке;
 1 — флюсовая подкладка; 2 — свариваемые детали;
 3 — электромагниты для прижатия листов к стенду; 4 — медная подкладка;
 5 — слой флюса на медной подкладке (флюсо-медная подкладка)

ственного выполнения соединения при этом способе требовалось тщательное соблюдение зазора по длине стыка и равномерность поджатия флюса по длине ручья, что не всегда выполнимо. Хорошие результаты дает секционированная медная подкладка с канавкой для формирования обратного валика, закрепляемая с возможно плотным прижатием тем или иным способом (рис. 2.18, *в*). Недостатком является возможность «убегания» ванны при повышенных зазорах между подкладкой и изделием. Этот недостаток полностью ликвидируется при применении медно-флюсовой подкладки (рис. 2.18, *г*). Здесь перед прижимом секции подкладки к изделию на ее поверхность насыпается слой мелкого флюса, предотвращающего «утекание» ванны при наличии зазора между подкладкой и изделием. В последнее время в качестве подкладки многоразового использования применяются различного рода керамические подкладки, закрепляемые липкой лентой или другими способами.

Тавровые соединения рационально сваривать полуавтоматической сваркой с применением тонкой электродной проволоки 1,6...2,0 мм. При оптимальном подборе силы тока и скорости сварки получается хорошее менисковое формирование сварного шва. В зависимости от требований к сварному соединению оно может выпол-

няться как с разделкой одной или двух кромок (с полным проваром стенки), так и без разделки кромок (корень соединения не проварен).

Дуговая сварка в защитных газах может выполняться в инертных и активных газах. К первым относится аргон и гелий, наиболее ярким представителем вторых является углекислый газ. Сварка в инертных газах может производиться неплавящимся (вольфрамовым) (рис. 2.19, *а*) или плавящимся (рис. 2.19, *б*) электродом.

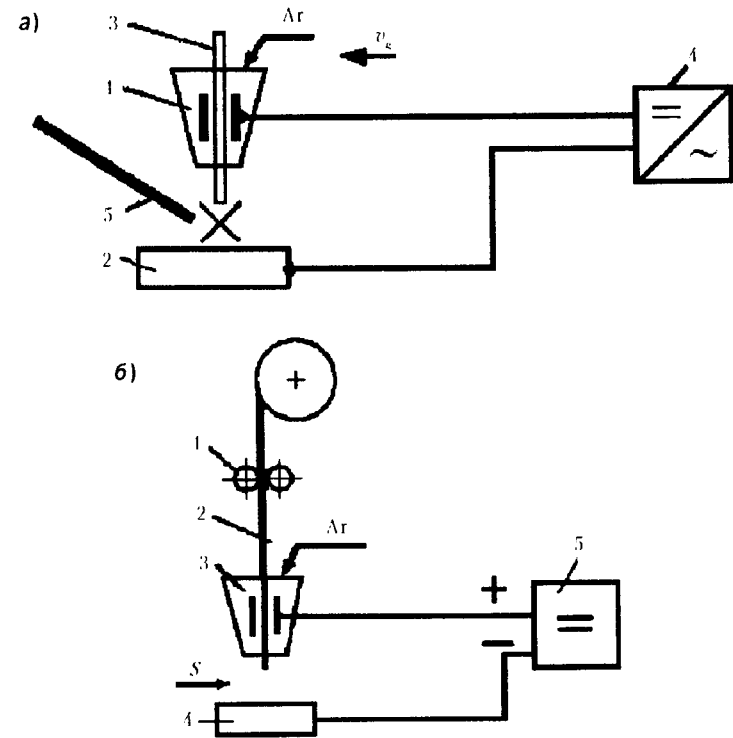


Рис. 2.19. Принципиальная схема сварки в среде защитных газов:

- a* — неплавящимся (вольфрамовым) электродом;
 1 — сопло горелки; 2 — свариваемое изделие; 3 — вольфрамовый электрод;
 4 — источник питания; 5 — присадочный пруток;
б — плавящимся электродом;
 1 — подающие ролики; 2 — электродная проволока;
 3 — сопло горелки; 4 — свариваемые изделия; 5 — источник сварочного тока

Первый вид может выполняться ручным или механизированными способами (полуавтоматическая или автоматическая сварка). Оба эти способа относятся к струйной защите, когда струя защитного газа, вытекающая из сопла горелки, оттесняет воздух из реакционной зоны, а инертный газ, окружающий дугу и ванну жидкого металла, не реагирует с последним при любой температуре. Кроме этого, именно в инертном газе наблюдается высокая стойкость вольфрамового электрода из-за его большого химического сродства к кислороду.

Основной инертный газ, применяемый на практике, – аргон. Возможно применение гелия или аргоногелиевых смесей. Способ широко распространен для сварки металлов относительно малой толщины (1,0...5,0 мм) при небольшой протяженности соединений, расположенных во всех пространственных положениях. Преимущественное применение способа – для сварки конструкций из высоколегированных сталей и химически активных металлов и их сплавов (алюминий, титан, цирконий и т. д.). Сварка свободно истекающим потоком газа имеет свои особенности (рис. 2.20, а).

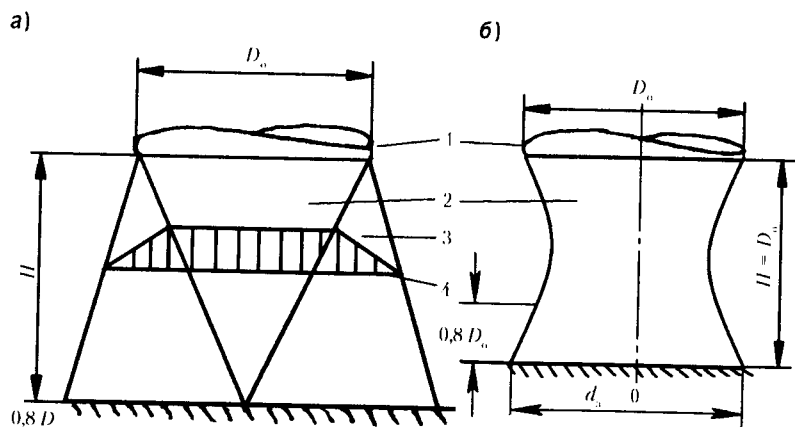


Рис. 2.20. Схема истечения газа из сопла горелки:

- а – свободное истечение струи; б – деформация струи при встрече с препятствием (свариваемым изделием);
 1 – сопло горелки; 2 – потенциальное ядро струи (область постоянных концентраций истекающего газа);
 3 – пограничный слой; 4 – эюра концентрации истекающего из сопла газа

Обычно расстояние от среза сопла до изделия должно быть таким, чтобы ванна расплавленного металла находилась в зоне потенциального ядра – при этом обеспечивается качественная защита жидкого металла

ванны. Пограничный слой зоны защиты содержит переменный состав защитного газа, концентрация которого убывает от потенциального ядра к границе наружного слоя. Струя газа, истекающая из сопла горелки и имеющая потенциальное ядро с постоянной концентрацией газа, натекая на свариваемую поверхность, деформируется (рис. 2.20, б), увеличивая зону надежной защиты, диаметр которой можно определить по эмпирической формуле

$$d_s = 0,33D \left(5,3 - \frac{H}{D} \right),$$

где D – диаметр сопла горелки, мм; H – расстояние между срезом сопла горелки и свариваемой деталью, мм.

Основным недостатком способа ручной сварки неплавящимся электродом является его малая производительность и относительная дороговизна, связанная со стоимостью инертных газов. Поэтому способ практически не применяют при сварке толстолистовых сварных соединений из перлитных сталей различных марок. В ряде случаев его используют лишь для сварки корня шва, где удается получить удовлетворительное формирование обратного валика (например, при V-образной разделке для стыков стальных трубопроводов).

Качество формирования шва зависит от диаметра присадочной проволоки и скорости ее подачи в зону сварки. Следует отметить, что увеличение диаметра присадочной проволоки снижает глубину проплавления. Ориентировочно диаметр присадки выбирают в зависимости от силы тока или прямо связанного с ней диаметра вольфрамового электрода

$$d_{пр} = (0,5...0,7)d_{эл}^W.$$

Качество струйной защиты зависит от длины начального участка струи H (см. рис. 2.20), конструкции и геометрии сопла, расхода защитного газа через него. Основным недостатком такой защиты является возможность ее нарушения поперечными потоками воздуха (сквозняками). При этом открывается доступ воздуха в зону сварки и связанное с этим окисление и азотирование металла шва. Есть способы, уменьшающие «сдувание» защиты (специальные конструкции выходных сопел, увеличение расхода газа), однако они не решают вопроса кардинально. Поэтому был предложен другой путь – создание специализированных установок, в которых сварка ведется в контролируемой атмосфере инертного газа. Эти установки могут быть от-

носителем простыми, где в небольшом, изолированном от воздушной атмосферы и заполненном инертным газом объеме сварка ведется через уплотненные резиновые рукава ручным способом. Но большее применение имеют установки с контролируемой инертной атмосферой (рис. 2.21), где сварка (ручная или механизированная) ведется операторами, находящимися в специальных скафандрах, внутри установки (в объеме, заполненном инертным газом). Она представляет собой жесткий герметично выполненный корпус, изготовленный из коррозионноустойчивой стали. Перед заполнением инертным газом при помощи системы вакуумирования в установке создается вакуум не менее 10^{-3} мм рт. ст.

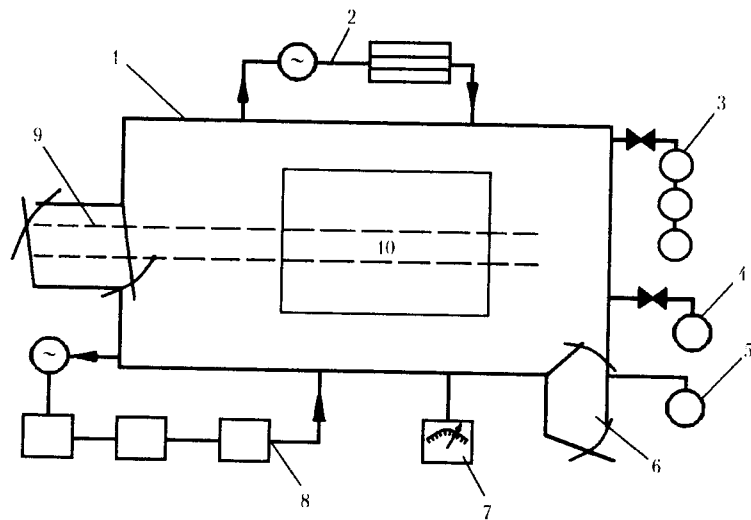


Рис. 2.21. Принципиальная схема установки для сварки в инертной контролируемой среде:

1 – корпус установки; 2 – система терморегуляции; 3 – рампа (система заполнения установки инертным газом); 4 – система вакуумирования; 5 – система жизнеобеспечения; 6 – шлюз для входа людей; 7 – система контроля; 8 – система очистки; 9 – грузовой шлюз; 10 – рабочее место

В конструкции корпуса предусмотрены специальные шлюзы: для входа операторов; ввоза деталей, оборудования, инструмента и вывоза готовой конструкции. Кроме этого имеются гермовводы для подачи тока, воды и т. д. Шлюзы имеют герметические двери, одна из которых открывается внутрь установки. Размеры грузового шлюза

зависят от общего объема установки и габаритов изготавливаемых изделий, людского шлюза – берутся из расчета одновременного шлюзования двух операторов. Грузовой шлюз вакуумируется и заполняется инертным газом так же, как и основной объем установки. По иному эксплуатируется шлюз для людей. После входа операторов, одетых в герметичные мягкие костюмы из прорезиненной ткани с индивидуальным жизнеобеспечением (или подачей и отводом воздуха специальной системой), и закрытия обеих дверей шлюз снизу продувается аргоном. Аргон тяжелее воздуха, он вытесняет последний через верхние клапана шлюза; после этого открывается внутренняя дверь, и операторы входят в основной объем установки. Операторы открывают внутреннюю дверь грузового шлюза, куда заранее помещены детали свариваемой конструкции, необходимое оборудование и инструмент, и на специальной тележке транспортируют на рабочее место, где начинается сборка и сварка конструкции. В процессе работы может нарушаться заранее установленная чистота газовой атмосферы из-за газовыделений из расплавленного металла, скафандров, смазки механизмов и т. д. Для доведения инертной атмосферы до нужной чистоты и удаления примесей служит система газовой очистки, а для контроля за содержанием примесей – система контроля. В первой системе газ при помощи побудителя (вентилятора) прогоняется через ряд блоков, где происходит очистка от паров воды, кислорода и азота. Система контроля может работать в автоматическом режиме: как только содержание примесей превысит заданный уровень, включается система газовой очистки, которая будет работать до тех пор, пока чистота газа не достигнет первоначальной заранее заданной. Температура газовой атмосферы внутри установки поддерживается в комфортных пределах при помощи системы терморегуляции. На практике такие установки представляют собой сложные и дорогостоящие инженерные сооружения объемом до 100 м^3 . Однако дороговизна эта довольно быстро окупается за счет:

- 1) стабильности качества сварных соединений, определяемой тем, что сварка всегда проводится в однородной и контролируемой среде инертного газа.
- 2) значительного упрощения сварочной горелки: по существу, она представляет держатель для вольфрамового электрода, не имеет систем газоснабжения и (как правило) водяного охлаждения, что значительно уменьшает ее габариты и делает возможным сварку сложных конструкций с труднодоступными для обычных горелок местами;
- 3) многократного использования инертного газа (заполненный объем используется до года), что снижает расходы на его приобретение.

Строительство и эксплуатация таких установок оправданы тогда, когда другие способы сварки не обеспечивают стабильность уровня качества сварных швов (особенно это проявляется при сварке конструкций из химически активных металлов и сплавов).

С 1960 г. все более широко применяется полуавтоматическая и автоматическая сварки плавящимся электродом в активном защитном газе – CO_2 (см. рис. 2.19, б). В этом случае в зоне дуги происходит диссоциация молекулы CO_2 на термически стойкую молекулу угарного газа CO и кислород. Практически защитным газом является CO и образующиеся при плавлении пары металла. Кислород окисляет поверхность металла и может способствовать выгоранию легирующих элементов, что требует их восполнения через электродную проволоку. В последнее время все большее распространение получает комбинированная газовая защита, когда в качестве защитного газа применяется смесь активных и инертных газов в различном соотношении.

Универсальными смесями являются:

- 82% $\text{Ar} + 18\% \text{CO}_2$ – применяется для широкого диапазона сварных конструкций низкоуглеродистых и низколегированных сталей;
- 86% $\text{Ar} + 12\% \text{CO}_2 + 2\% \text{O}_2$ – обеспечивает стабильное горение дуги и большую глубину провара;
- 85% $\text{He} + 13,5\% \text{Ar} + 1,5\% \text{CO}_2$ – практически не окисляет поверхность шва и обеспечивает хорошее формирование его поверхности.

Гелевые смеси изменяют форму провара, повышают температуру сварочной дуги и производительность труда. Существует еще ряд смесей системы $\text{Ar}-\text{He}-\text{CO}_2-\text{O}_2$. Изменение химического состава смеси приводит к изменению ее теплофизических характеристик и потенциала ионизации, что и является причиной изменения параметров проплавления и формирования шва. По сравнению со сваркой в чистом CO_2 , сварка в многокомпонентных смесях обладает определенными преимуществами. Прежде всего, наблюдается значительное уменьшение разбрызгивания электродного металла, а это ведет к резкому уменьшению объема работ по удалению брызг с металла шва и околошовных участков (т. е. к уменьшению трудозатрат). Практические свойства металла шва, выполненного в смеси, остаются на уровне свойств металла шва, сваренного в CO_2 , удлинение растет в среднем на 8...10%, ударная вязкость (KCV) увеличивается в 1,5–2 раза в зависимости от состава смеси.

При использовании многокомпонентных смесей предпочтительнее готовые смеси, так как иначе требуется применение специальных

газовых смесителей с соответствующей системой контроля за соблюдением заданного состава. Следует отметить, что применение многокомпонентных газовых смесей при полуавтоматической сварке в мировой промышленности ежегодно растет.

Плазменную сварку и резку часто называют сваркой сжатой дугой (рис. 2.22). В специальном плазмотроне в цилиндрическом канале происходит обжатие столба дуги, горячей между вольфрамовым электродом и изделием, потоком плазмообразующего газа, проходящим через канал сопла (отсюда термин – сжатая дуга).

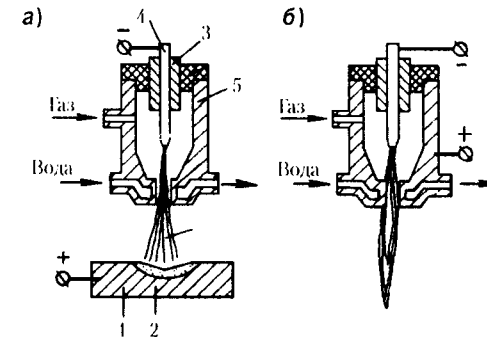


Рис. 2.22. Схема плазмотронов для плазменной сварки (сварке сжатой дугой):

а – прямого действия;

- 1 – свариваемое изделие; 2 – сварочная ванна;
3 – зажимная цапга; 4 – вольфрамовый электрод;
5 – сопло плазмотрона;
б – косвенного действия

Основные преимущества способа – высокая концентрация энергии в пятне нагрева ($10^4 \dots 10^6 \text{ Вт/см}^2$) и стабильность горения дуги. При этом устойчивость процесса во многом зависит от конструкции и материала сопловой части плазмотрона, электрода, расхода плазмообразующего и защитного газа. Состав плазмообразующего газа и величина его расхода выбираются, исходя из свойств электрода, состава свариваемого металла и требований к устойчивости дуги. Так, если применяется вольфрамовый электрод, то в качестве плазмообразующего газа могут быть использованы Ar , He , N_2 и H_2 (или их смеси). Как правило, расход плазмообразующего газа невелик и составляет 0,2...1,5 л/мин. Состав и расход защитного газа зависит от свойств свариваемого материала. С увеличением силы тока и скорости истечения плазмообразующих потоков формирование шва на

подкладке затруднено. Поэтому часто удовлетворительного формирования удается достичь только при создании сквозного отверстия в головной части ванны, через которое удаляются раскаленные газы и пары металла. Правда, такой процесс возможен в весьма узких диапазонах режима.

Плазменная сварка имеет две разновидности процесса: плазменной струей прямого и косвенного действия. В первом случае источник тока одним полюсом подключается к электроду плазмотрона, вторым – к изделию. Второй вид предполагает подключение источника тока одним полюсом к электроду, а вторым – к соплу плазмотрона. Здесь активные пятна дуги находятся на вольфрамовом электроде и внутренней боковой поверхности сопла. Дуговая плазменная струя представляет собой интенсивный источник теплоты с широкими технологическими возможностями. Плазменной струей можно сваривать практически все металлы и сплавы в нижнем и вертикальном положении. Процесс имеет высокую производительность и позволяет без разделки кромок сваривать толщины до 15 мм (дугой со сквозным проплавлением). Высокая концентрация энергии обеспечивает специфическую, «кинжальную» форму проплавления с малой шириной и большой глубиной провара. Весьма успешно применяют плазму и для резки металлов. Этот процесс основан на расплавлении металла в зоне реза и его последующем выдувании потоком плазмы. Малые толщины режут дугой косвенного действия.

В последнее время, с появлением более стойких водоохлаждаемых циркониевых и гафниевого электродов, в качестве плазмообразующего газа используют воздух. Высокая концентрация энергии плазменной струи обеспечивает относительно большую скорость резки и по сравнению с кислородно-ацетиленовой резкой уменьшение деформаций кромок вырезаемых деталей в 2–2,5 раза.

Электрошлаковая сварка (ЭШС) используется для расплавления металла теплотой, выделяемой при прохождении тока через расплавленный шлак. Свариваемые детали с определенным зазором устанавливаются вертикально (рис. 2.23).

Автомат передвигается по поверхности листа по специальной зубчатой рейке, установленной рядом с выполняемым швом. Шов формируется между торцами листов в зазоре, с обеих сторон закрытом неподвижной подкладкой и водоохлаждаемым ползуном. Процесс начинается как дуговой на подкладной планке при неподвижной дуге. По мере наведения шлаковой ванны дуга гаснет (шунтируется), и процесс расплавления идет за счет теплоты, выделяемой при протекании тока через расплавленный шлак. Количество выделенной теплоты

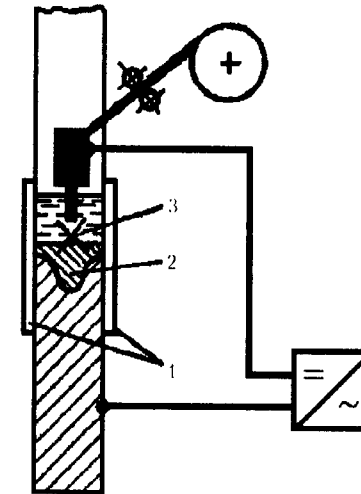


Рис. 2.23. Схема процесса ЭШС:

1 – неподвижная (левая) и подвижная подкладки (ползун);
2 – ванна расплавленного металла; 3 – ванна жидкого шлака

$$Q = 0,24I^2 R_{ш},$$

где $R_{ш}$ – сопротивление шлаковой ванны.

Теплота равномерно распределяется по объему сварочной ванны и приводит к оплавлению кромок и расплавлению электродной проволоки. Такое распределение теплоты особенно благоприятно при сварке больших толщин, что позволяет за один проход сваривать элементы различных конструкций толщиной 100 мм и более. Преимуществом процесса является высокая производительность, сравнительная простота, возможность автоматизации. В качестве электрода применяют проволочные системы (одна или несколько проволок), электродные пластины или плавящиеся мундштуки. Выбор системы и конструкции автомата диктует толщина и форма свариваемых кромок.

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС). При этом способе сварки (рис. 2.24) источником нагрева служит концентрированный поток электронов, имитируемый катодом электронно-лучевой трубки. Тепло выделяется в металле в результате торможения электронов, разогнанных в трубке до высоких скоростей и накопивших большой запас кинетической энергии. Сварка осуществляется в вакууме $10^{-1} \dots 10^{-5}$ мм рт. ст. в специальных камерах. Вакуум позволяет сваривать химически

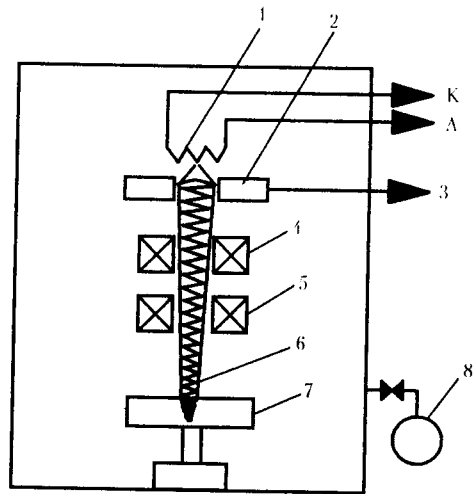


Рис. 2.24. Принципиальная схема установки для ЭЛС:

1 – катод трубки; 2 – анод трубки; 3 – к источнику питания; 4 – фокусирующая система;
5 – отклоняющая система; 6 – электронный луч; 7 – свариваемая деталь;
8 – система вакуумирования

активные материалы, не дает рассеивания электронного луча и обеспечивает высокий эффективный КПД процесса (0,85...0,95). ЭЛС позволяет сваривать без разделки кромок весьма большие толщины (100 мм в зависимости от мощности электронной трубки), производительность процесса по крайней мере в 1,5–2 раза выше, чем при дуговой сварке.

Недостатками процесса являются высокая стоимость оборудования, его сложность и необходимость строго выдерживать по длине соединения зазор в стыке (обязательна механическая обработка кромок деталей). Последняя связана с тем, что при малом диаметре пятна нагрева (его диаметр при помощи фокусирующей системы может изменяться от 0,05 до 5,0 мм при плотности энергии $10^4 \dots 10^6$ Вт/см²) получается клиновидная форма проплавления и возникает необходимость точного ведения луча по стыку с малым зазором. Фокусировка луча может менять плотность энергии, изменяя этим форму проплавления (рис. 2.25). При оптимальной фокусировке необходимо применять системы слежения с высокой точностью направления луча по стыку ($\pm 0,15$ мм). Сканирование луча позволяет избежать ряда дефектов, характерных для ЭЛС. К ним относятся несплавление кромок в корне

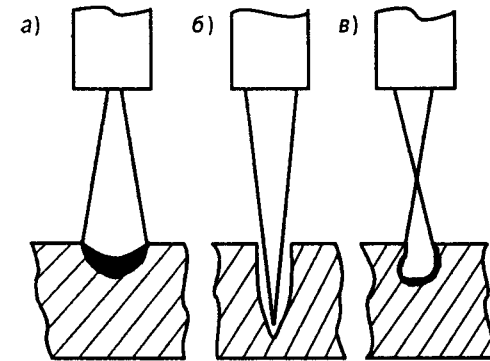


Рис. 2.25. Фокусировка электронного луча:

а – луч расфокусирован; б – нормальная фокусировка;
в – перефокусировка

шва, подрезы и др. Используются прямоугольные или синусоидальные поперечные колебания в широком диапазоне частот (10...800 Гц) с амплитудой колебаний 0,5...2,0 мм. Иногда наряду с поперечными колебаниями применяют продольные. Луч может работать в постоянном или импульсном режиме. В последнем случае тепловыделение дополнительно регулируется частотой и длительностью сварочных импульсов.

Лазерная сварка и резка. Лазер представляет собой оптический квантовый генератор, создающий когерентное излучение определенной длины волны. По виду активного вещества излучателя лазеры разделяют на твердотельные и газовые, работающие в импульсном режиме и режиме постоянного излучения.

В современных твердотельных лазерных сварочных установках (рис. 2.26, а) в качестве активного элемента может использоваться монокристалл рубина, стекло с примесью неодима или других редкоземельных элементов; эти лазеры работают в импульсном режиме излучения. В качестве генератора возбуждения здесь использована газоразрядная лампа. Если кристалл рубина осветить зеленым светом лампы накачки, то ионы хрома возбуждаются и переходят на более высокий энергетический уровень. Однако уровень этот нестабилен, и частицы быстро переходят (безызлучательно) на промежуточный метастабильный уровень. По мере достаточной заселенности этого уровня переход хотя бы одной частицы на низший энергетический уровень вызывает лавнообразный переход из него и других частиц, что приводит к созданию когерентного излучения с определенной длиной волны.

Твердотельные лазеры имеют довольно низкий КПД, и их применение для обработки металлов сильно ограничено.

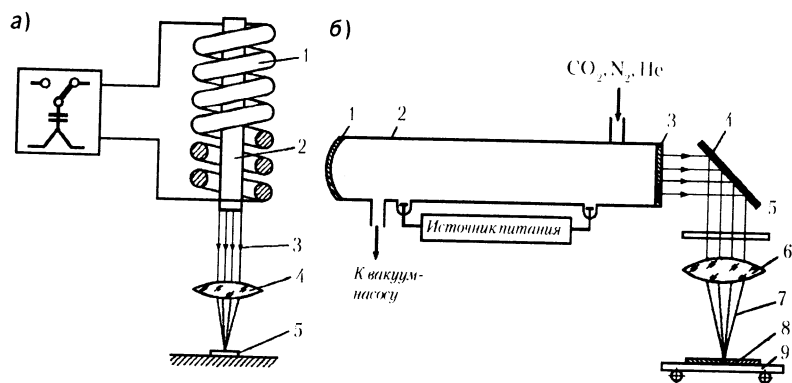


Рис. 2.26. Схемы технологических лазеров:
а - твердотельный;

1 - лампа накачки; 2 - монокристалл; 3 - лазерный луч; 4 - линза-конденсатор;
5 - свариваемая деталь;

б - газовый;

1 - зеркало-отражатель; 2 - камера лазера; 3 - решетка; 4 - поворотная призма;
5 - решетка; 6 - конденсаторная линза; 7 - сфокусированный луч;
8 - свариваемая деталь; 9 - устройство для перемещения детали

Для технологических целей используются в основном газовые лазеры (рис. 2.26, б) с непрерывным излучением. Их КПД может быть на порядок больше (выше 30%), мощность их достигает 25 кВт и более. Активный элемент такого лазера может представлять углекислый газ с добавками азота и гелия; эта среда возбуждается стационарным тлеющим разрядом. Плотность энергии в пятне нагрева (его диаметр в зависимости от фокусировки луча может быть 0,1...1,5 мм) достаточно высока (до 10^6 Вт/см²). Плотность тепловой энергии в пятне нагрева луча зависит от его мощности и поглощательной способности свариваемых кромок (состояние поверхности и длины волны излучения).

При сварке лазером непрерывного излучения форма и размеры сварочной ванны примерно похожи на таковую при сварке плавлением. Способ широко применяется для сварки различных изделий в радиоэлектронной промышленности. Преимущества лазерного луча как технологического инструмента хорошо реализуются при резке различных материалов.

При воздействии лазерного излучения на металлы возможны два механизма резки - плавлением и испарением. Поверхность разрушения, или так называемый канал реза, существует по всей разрезаемой толщине и перемещается в процессе резки со средней скоростью в направлении резки. Практически работает первый механизм, так как реализация второго затруднена в связи с достаточно высокими удельными энергозатратами. При лазерной резке часто используют кислород в качестве вспомогательного газа, который обеспечивает выделение в канале реза дополнительной теплоты экзотермической реакцией. Кроме этого, кислород способствует предварительному окислению металла и уменьшению его отражательной способности, сдуванию и выносу из зоны резки расплавов и продуктов сгорания металла, чем обеспечивает одновременный приток кислорода к фронту реакции горения.

Ширина реза зависит от степени фокусировки луча и скорости резки. Толщина разрезаемого материала напрямую связана с мощностью излучения.

Важным является то обстоятельство, что при высокой концентрации нагрева и относительно высоких скоростях реза уменьшается ширина зоны упруго-пластической деформации и, как следствие, уменьшается деформация и увеличивается (по сравнению с кислородно-ацетиленовой и плазменной резкой) точность вырезаемых деталей. Большим затруднением при лазерной сварке и резке является транспортировка луча к месту выполнения операции. Как правило, она осуществляется оптическим способом, что часто приводит к созданию сложных и тяжелых в эксплуатации систем. Видимо, применение в ближайшем будущем стекловолоконных проводников из-за их гибкости значительно упростит эту операцию.

2.3. ПАЙКА МЕТАЛЛОВ

Пайка представляет собой физико-химический процесс соединения металлов в результате взаимодействия основного (паяемого) металла и припоя (жидкого присадочного металла). При заполнении зазора между паяемыми деталями расплавленным припоем между ним и деталями образуется межатомная связь. Для получения качественного спаия необходимо удалить оксидную пленку с соединяемых поверхностей, создав этим условия для взаимодействия твердого и жидкого металлов. Имея определенное сходство

со сваркой плавлением, пайка, тем не менее, значительно от нее отличается. Пайка происходит при температурах ниже температур плавления металла соединяемых деталей, и формирование шва связано с капиллярным течением жидкого металла, заполняющего зазор. При пайке не происходит высокотемпературного нагрева деталей, что не приводит к их деформации, а низкотемпературный нагрев позволяет сохранить неизменность структуры и свойств основного металла. Пайка (в противоположность сварке) образует разъемные соединения.

В соответствии с технологическими особенностями процесса пайку классифицируют по следующим признакам:

- по характеру взаимодействия твердого и жидкого металлов при возникновении спая;
- по особенностям технологии образования паяного соединения;
- по способам нагрева.

По первому признаку выделяют пять видов спаев.

1. *Бездиффузионный* – в процессе пайки основной металл и жидкий припой вступают в физико-химическое взаимодействие, обусловленное разницей их свойств и энергетического состояния. При снижении температуры пайки и времени выдержки интенсивность взаимодействия уменьшается и появляется возможность образования химических связей при отсутствии диффузии в объеме взаимодействующих металлов.
2. *Диффузионный* – наблюдается растворение основного металла в припой и взаимная диффузия элементов, входящих в состав припоя и основного металла. Используется для повышения температуры плавления припоя и выравнивания химического состава шва и основного металла.
3. *Капиллярный* – расплавленный припой затекает в зазор благодаря смачиванию стенок капилляра. Заполнение зазора зависит от величины поверхностного натяжения и плотности припоя.
4. *Контактно-реактивный* – жидкий припой образуется в результате взаимодействия с основным металлом (взаимной диффузии) введенных в зазор твердых металлических прокладок или покрытий, которые наносятся на контактируемые поверхности различными методами металлизации. При этом температура плавления припоя ниже температуры плавления металла прокладок.
5. *Металлокерамический* – осуществляется припоями-наполнителями (порошками или волокнами) более тугоплавких, чем припой, металлов. Шов образуется в результате взаимодействия

жидкой части припоя с основным металлом и наполнителем, что приводит к повышению температуры плавления и прочности металла шва. Такие припои обладают малой растекаемостью, и перед пайкой их закладывают в зазор между деталями.

Нагрев деталей при пайке может быть местным (в районе шва) и общим. По температурам плавления припои делятся на мягкие ($T_{пл} \geq 450$ °С) и твердые ($T_{пл} = 450...900$ °С). Местный нагрев может производиться пламенем газовой горелки, индукционным нагревом, паяльником. Общий нагрев производится в печах, пайкой погружением в ванну расплавленных солей, флюсов, припоя.

Взаимодействие между металлами при пайке может завершаться на разных стадиях развития процессов между основным металлом и припоем. В соответствии с этим будут меняться состав, структура спая и отдельных зон паяного соединения. Если процесс прекращается на стадии возникновения химических связей, когда можно пренебречь взаимной диффузией паяемого металла и расплава припоя, то образуется бездиффузионный спай. Последующая выдержка во времени создает условия для развития диффузионных процессов. Спай, который образуется в условиях протекания растворо-диффузионных процессов, называют растворо-диффузионным. Спаи, возникающие в результате контактного плавления (переход в жидкое состояние разнородных материалов при температуре ниже их точки плавления), относят к контактно-реакционным.

Перед пайкой любым способом паяемая поверхность деталей должна быть тщательным образом очищена для удаления различного рода неметаллических загрязнений. Поэтому металлическая поверхность должна быть подготовлена к пайке. Способы подготовки поверхности разнообразны.

Термическая очистка производится ацетилено-кислородной горелкой. При удалении окалины и изоляции этот способ сочетается с последующей обработкой поверхности металлическими щетками.

Механическая очистка хороша тем, что создает шероховатую поверхность, улучшающую капиллярное течение припоя в зазоре. Инструментом служат металлические щетки, напильники, шабер, шлифовальные шкурки. Рекомендуется для подготовки поверхности алюминиевых сплавов с целью удаления с поверхности деталей окисной пленки Al_2O_3 , прочно сцепленной с металлом детали. При необходимости очистки большого количества одинаковых по форме мелких деталей и удаления заусенцев с их кромок рационально применять галтовочные барабаны. Эффективны гидрокоструйная и дробеструйная обработка; первая производится в специальных гидрокоструйных камерах.

Химическая очистка производится путем обезжиривания деталей и их травления с последующей промывкой в воде. Обезжиривание проводят с целью удаления с поверхности жировых загрязнений. Составы для обезжиривания разнообразны и зависят от химического состава деталей, подлежащих обезжириванию, а также от характера и степени загрязненности деталей. Так, для обезжиривания поверхности стальных и чугунных деталей применяют состав, содержащий: едкий натр (15...30 г/л), углекислый натрий (10...35 г/л), тринатрийфосфат (10...65 г/л). Для обезжиривания поверхностей алюминиевых деталей: едкий натр (10 г/л), углекислый калий (50...60 г/л) и жидкое стекло (30 г/л). Консервирующие смазки с поверхности изделий со сложной конфигурацией, с внутренними полостями и глубокими отверстиями удаляют с помощью органических растворителей – бензина, ацетилена, дихлорэтана и др.

Химическое травление. Составы ванн для химического травления весьма разнообразны и зависят от химического состава металла деталей, подлежащих травлению. Так, для углеродистых сталей применяют состав: серная кислота (150 г/л), хлористый натрий (4 г/л), присадка КС (4 г/л); для алюминия и его сплавов: едкий натр (20...35 г/л) и углекислый натрий (20...30 г/л). Существуют и другие способы травления (электрохимическое, с применением ультразвука, одновременное обезжиривание и травление).

Следует отметить, что наряду с тщательной подготовкой поверхности детали перед пайкой, в процессе пайки происходит окисление металла из-за нагрева поверхности. Да и на подготовленной поверхности могут возникнуть окисные пленки в процессе длительного хранения деталей после обработки поверхности. Поэтому при пайке практически всегда применяют флюсы, которые предназначены для защиты металла от окисления кислородом из окружающей среды, очистки поверхностей от окисных пленок и улучшения смачиваемости металла припоем.

Флюс для пайки должен иметь меньший удельный вес и температуру плавления, чем припой, и в расплавленном виде хорошо смачивать металл. Эти свойства способствуют очистке поверхностей от окисных пленок до плавления припоя и вытеснению флюса по мере растекания припоя. В зависимости от свойств паяемых металлов и применяемых для них припоев флюсы можно разделить на три группы.

1. Флюсы, предназначенные для пайки мягкими припоями на основе олова и свинца. Основой таких флюсов служат органические соединения (канфоль, вазелин), хлориды цинка или аммония. Флюсующий эффект канфоли ($T_{пл} = 125^\circ\text{C}$) связан

с содержанием в ней абиеиновой кислоты, растворяющей некоторые оксиды. При температуре 300...400 °С канфоль разлагается с выделением углерода и водорода, что ведет к интенсификации восстановления окислов паяемого металла. В нашей стране и за рубежом разработано большое количество флюсов для низкотемпературной пайки черных и цветных металлов. Перечисленные выше органические вещества в чистом виде в настоящее время применяются редко. Большое применение нашли органические флюсы, активированные различными неорганическими соединениями. Такие флюсы используются для пайки не только меди и ее сплавов, но и конструкционных углеродистых и коррозионноустойчивых высоколегированных сталей. Примером может служить флюс ЛМ-1, предназначенный для пайки хромоникелевых, коррозионноустойчивых сталей припоем с содержанием олова 30%. Он имеет состав: ортофосфорная кислота 32%, канфоль 6%, спирт этиловый 62%. Температурный интервал активности флюса составляет 200...240 °С. Другой флюс состава: хлористый цинк 48%, хлористый аммоний 12% и вода 40% – предназначен для пайки углеродистых и низколегированных сталей, меди, никеля и их сплавов и имеет температурный интервал активности 150...320 °С.

2. Флюсы, предназначенные для пайки твердыми припоями. Они содержат фтористые соединения (RF , CaFe_2 и др.), фторобораты (KBF_4 , NaBF_4 и др.) и обязательно борный ангидрид B_2O_3 , борную кислоту H_3BO_3 или плавленную буру $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$. Флюсы получают методом сплавления компонентов, используют сплав в виде порошков или паст, замешанных на воде, спирте или других связках. Так, для пайки конструкционных и коррозионноустойчивых легированных сталей служит флюс марки ПВ209, имеющий состав: калия фтористого 41...43%, оксида бора 34...36%, тетрафторбората калия (KBF_4) 22...24%. Температурный интервал активности 800...1200 °С. Флюс марки 18В служит для пайки сталей, никелевых, медных сплавов серебряными припоями: содержит фтористый калий и борную кислоту; его температурный интервал 550...850 °С.
3. Флюсы, предназначенные для пайки алюминия и его сплавов (фториды и хлориды металлов). Примером может служить флюс марки Ф5, содержащий хлористый калий (45%), хлористый магний (28%), фтористый натрий (10%), хлористое олово (3%), хлористый кадмий (4%). Температурный интервал его

активности 420...620 °С; предназначен для пайки алюминиевых сплавов типа АД1, АМц и АМг.

Одновременно с выбором марки флюса выбирают состав припоя. При сварке мягкими (низкотемпературными) припоями большое распространение имеют оловянно-свинцовые припой марок ПОС (ПОС-90, ПОС-40, ПОС-61 и т. д.). Так, припой ПОС-61, имеющий состав цинка 60...62% (остальное – свинец), имеет температуру начала плавления 190 °С и служит для лужения и пайки медных деталей (радио- и электроаппаратура).

Разнообразен состав припоев для высокотемпературной пайки твердыми припоями. Он в основном зависит от состава паяемого металла и условий эксплуатации конструкции. По системе легирования эти припои делятся на несколько групп.

Серебряные и палладиевые припои. Эти припои, содержащие серебро, обладают повышенной тепло- и электропроводностью, высокой пластичностью, прочностью, коррозионной стойкостью и технологичностью. Позволяют производить нагрев различными способами в различных средах. Применяются серебряные припои с содержанием меди, цинка, кадмия, олова, фосфора и других элементов. Особо широкое распространение в промышленности получили припой марки ПСр72, содержащие 71,5...72,5% серебра (остальное – медь), и ПСр, содержащие 39,0...41,0% серебра, 16,0...17,4% меди и 16,2...17,8% цинка. Эти припои обладают высокой технологичностью.

Медно-цинковые припои представляют собой двойные сплавы меди и цинка в различных соотношениях. Интересны припои с содержанием цинка менее 39%; они имеют однофазную структуру и обладают наибольшей пластичностью. Иногда в их состав вводят олово и кремний в небольших количествах (до 1%). Олово снижает температуру плавления припоя и повышает его жидкотекучесть, а кремний снижает испарение цинка. Примером служит припой, содержащий 34...38% меди (остальное – цинк); температура его плавления 800...825 °С. Применяют припои этого типа для пайки углеродистых сталей и меди при нагреве ТВЧ, в соляных ваннах, газовой горелкой.

Медно-фосфористые припои. Сплавы меди с фосфором (4...9%) обладают высокой жидкотекучестью и коррозионной стойкостью, имеют сравнительно низкую температуру плавления и могут служить заменой серебряных и медно-цинковых припоев при пайке меди и ее сплавов.

В припои для пайки алюминиевых сплавов входят кремний, серебро, медь, цинк, кадмий и др. Наибольшей коррозионной стойкос-

тью обладают припои с кремнием (4...13%). Так, припой марки 35А содержит 20...22% меди, 6,5...7,5% кремния (остальное – алюминий) и имеет диапазон температур плавления 500...540 °С.

Процессы пайки деталей из различных материалов имеют свои технологические особенности. Так, окисная пленка на поверхности низкоуглеродистых и низколегированных сталей обладает низкой химической стойкостью и легко восстанавливается в атмосфере кислорода, диссоциировавшего из аммиака, в продуктах сгорания смесей воздуха с горючими газами. При пайке закаливающих низколегированных сталей возможен их отпуск в процессе пайки, что может привести к изменению их механических свойств. Поэтому пайку ведут при температуре высокого отпуска с применением припоев и флюсов, обеспечивающих получение высококачественных паяных соединений (припой ПСр-40 и флюс ПВ209). Повышенные скорости охлаждения соединения после пайки (если они требуются) можно обеспечить обдувом сжатым воздухом либо водяным охлаждением.

При пайке коррозионностойких сталей, легированных хромом и никелем, аустенитных, мартенситных и аустенитно-ферритных сталей на их поверхности образуются оксиды хрома, химически более стойкие, чем на нелегированных сталях. Поэтому их пайка представляет значительные трудности и требует выбора активных флюсов и газовых сред. При низкотемпературной пайке этих сталей паяльником или газовой горелкой применяют канифольно-спиртовые флюсы с добавкой ортофосфорной кислоты. Пайка таких сталей отличается за счет нанесения на соединяемые поверхности таких технологических покрытий как медь, серебро, никель. Это связано с тем, что в расплавленном состоянии флюсы практически не активируют поверхность стали и не защищают ее от кислорода воздуха. Растекаемость оловянисто-свинцовых и других легкоплавких припоев в этом случае можно улучшить предварительным лужением поверхности с применением активных флюсов; при этом припой можно наносить с помощью паяльника или горелки. Высокотемпературную пайку коррозионностойких сталей можно проводить серебряными, медными, никелевыми и другими припоями. Для пайки этих сталей в частности применяют чистую медь в качестве припоя; она хорошо смачивает поверхность стали при пайке в среде аргона с тетрафтористым бором (BF_3) при температуре 1150 °С.

Пайка алюминия и его сплавов низкотемпературными припоями затруднительна. Как правило, пайку производят с предварительным нанесением на поверхность паяемых деталей технологических покрытий: медь, гальванический или химический никель, серебро, цинк – толщиной 15...25 мкм. Эти покрытия могут наноситься термовакuumным

напылением, электрохимическим, химическим или другими способами. Лужение паяльником проводят абразивным или ультразвуковыми методами. При абразивном лужении оксидную пленку удаляют металлической щеткой, шабером, абразивным паяльником. Соединения, выполненные оловянно-свинцовыми припоями, при работе в нагруженных узлах и коррозионных средах склонны к шелковой коррозии, поэтому применение этих припоев не рекомендуется. Высокотемпературная флюсовая пайка алюминия и его сплавов может производиться с применением газопламенного нагрева (наряду с другими способами нагрева). При этом используют бензиновоздушные и газозвушнные смеси. Ацетилено-кислородное пламя непригодно, так как оно снижает активность флюса.

При пайке, в подавляющем большинстве случаев, прочностные характеристики припоя и паяного шва (σ_b и $\sigma_{0,2}$) ниже, чем аналогичные характеристики соединяемых металлов. Поэтому для получения равнопрочных соединений при пайке внахлестку увеличивают площадь сая (рис. 2.27).

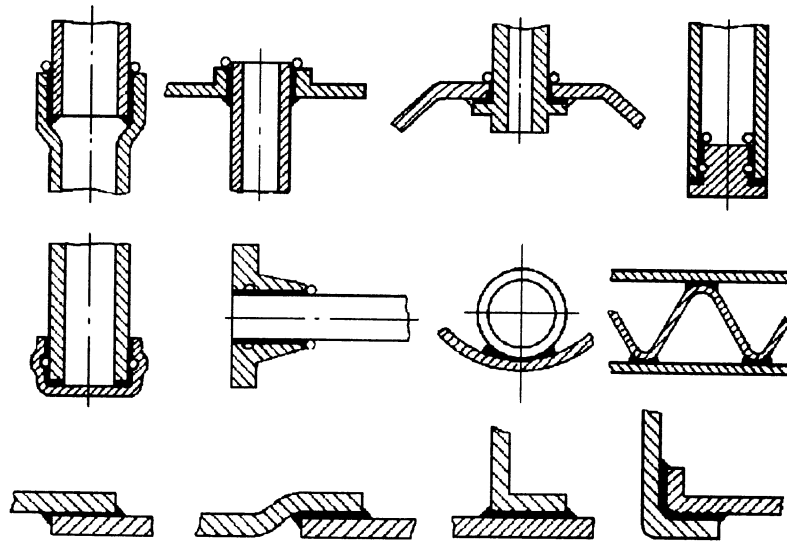


Рис. 2.27. Конструкции узлов различных видов для пайки

Если такие соединения выполняются методом капиллярной пайки, то уже при их проектировании необходимо предусмотреть выточки и желобы для размещения припоя и флюса. Нахлесточные соединения

во многом упрощают сборку деталей. Для обеспечения равнопрочности стыковых соединений при пайке необходимо увеличить площадь поперечного сечения деталей путем создания косых стыков (рис. 2.28).

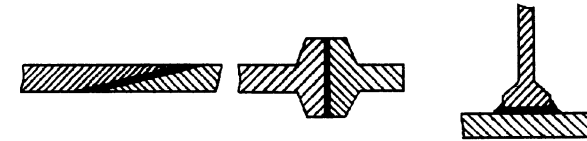


Рис. 2.28. Конструкции различных паяных узлов, обеспечивающих равнопрочность соединения

Если речь идет о пайке чистых металлов (медь, алюминий, никель), то равнопрочность соединений обеспечивается без развитых поверхностей контакта, так как прочность применяемых для этих металлов припоев выше прочности соединяемых металлов. Важным фактором, определяющим прочность паяных соединений, является величина зазора между соединяемыми деталями. При очень большом зазоре прочность соединения на разрыв практически близка к прочности припоя. С уменьшением зазора до определенного предела прочность растет. Это связано с эффектом контактного упрочнения мягкой паяной прослойки за счет сдерживающего влияния стенок и образованием в мягком паяном слое объемного напряженного состояния. Если припой активно взаимодействует с паяемым металлом, то с уменьшением зазора может изменяться химический состав припоя в шве, что может служить как повышению, так и понижению прочности соединения. В очень узком зазоре могут возникать непропаи и, как следствие, снижение прочности соединения. Величина зазора при ответственной пайке колеблется в пределах 0,05...0,25 мм при высокой чистоте обработки поверхности. При пайке неответственных деталей допускается более грубая поверхность (прокат) при зазорах 0,5...1,0 мм. Возможные дефекты в паяном соединении (непропай, поры, трещины) понижают прочность соединения. Предотвращение этого рода дефектов возможно при правильном выборе припоев и флюсов, хорошей подготовке кромок, тщательной сборке, равномерном нагреве и контролируемом времени пайки.

Обычно сварка позволяет получать соединения с прочностью и пластичностью выше, чем у паяных соединений. Однако пайка дает эффект в следующих случаях:

- требование равнопрочности соединения с основным металлом отсутствует;

- нагрев до высоких температур недопустим или нежелателен;
- нужно с высокой точностью подлутить узел из собранных деталей сразу после их соединения;
- нужно произвести соединение деталей с низкой свариваемостью, но нельзя по той или иной причине применить такие способы сварки как ЭЛС, лазерная.

В судостроении пайка применяется для выполнения разного рода жестяницких работ (в основном это пайка мягкими припоями при различного рода ремонтных работах). Здесь применяются обычно припой на медной и серебряной основе, пайка ведется с помощью ацетилено-кислородного пламени. В судовом машиностроении с помощью пайки изготавливают лопатки паровых и газовых турбин, направляющие газовых турбин, радиаторов, теплообменников, холодильников, сильфонов и т. д. К ряду соединений в подобных узлах часто предъявляют требования жаропрочности, жаростойкости, стойкости против газовой коррозии и пр. Поэтому при изготовлении узлов таких конструкций часто применяют металлокерамическую контактно-реактивную и диффузионную пайку – эти способы позволяют получать паяные соединения высокой прочности.

Широко используется пайка в судовом приборостроении, при изготовлении деталей электро- и радиоаппаратуры (соединение металлов со стеклом, керамикой, графитом).

Основные элементы технологии пайки любым способом следующие:

- очистка поверхностей, подлежащих пайке, от окисных пленок;
- флюсование, укладка припоя, сборка и фиксация деталей;
- нагрев до температуры пайки, выдержка и охлаждение (это и есть пайка);
- удаление остатков флюса с паяных деталей.

В такой последовательности составляется технологический процесс при пайке конкретных деталей. В этом процессе детализируются и конкретизируются проводимые операции, обеспечивающие получение паяных соединений высокого качества.

3. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ СВАРОЧНОЙ ДУГИ. СВАРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

3.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СВАРОЧНОЙ ДУГИ

Под электрической дугой понимают стабильный многоамперный разряд с низким катодным напряжением (до 10...20 В), горящий в ионизированном газе высокого давления (более $0,1 \cdot 10^5$ Па). Суммарное падение напряжения всех зон сварочной дуги находится в пределах 18...50 В; это определяет выходное напряжение сварочных источников тока относительно небольшой величиной (до 80...90 В).

Сварочная дуга характеризуется концентрированным выделением теплоты, что обеспечивает высокую эффективность нагрева и плавления металла. Диапазон мощностей сварочных дуг очень широк – от 50 Вт до 160 кВт. Различают прямое и косвенное действие дуги на металл. В первом случае свариваемый металл включен в сварочную цепь и является одним из электродов. Нагрев металла происходит в основном за счет выделения тепла в активных пятнах дуги, расположенных на электродах (удельная мощность нагрева в этих пятнах достигает 10^5 Вт/см²). Во втором случае основной металл не включен в сварочную цепь, и нагрев его происходит за счет теплопередачи от газов столба дуги и ее излучения (здесь удельная мощность нагрева значительно ниже, что уменьшает эффективность нагрева). Это дуга косвенного действия – она горит между двумя электродами.

В нормальном состоянии воздух, как смесь различных газов, не обладает электрической проводимостью, так как состоит из нейтральных атомов или молекул. Поэтому дуговой разряд возможен лишь при условии наличия в дуговом промежутке частиц, способных переносить электрические заряды. Иными словами, необходима частичная ионизация газов дугового промежутка. В сварочной дуге газ поддерживается в ионизированном состоянии принудительно и непрерывно благодаря приложенному к электродам электрическому потенциалу. Если рассматривать строение дуги постоянного тока (рис. 3.1), то можно выделить три основные зоны: прикатодную зону, столб дуги и прианодную зону. Дуга горит в частично ионизированном газе, состоящем из смеси нейтральных частиц, ионов и электронов (плазма дуги).

Плазма в дуге находится в виде цилиндрического или конического проводника, называемого столбом дуги. У обоих электродов

имеются прикатодная и прианодная области, отделяющие столб дуги от электродов. Области эти невелики по протяженности. На электродах находятся катодные и анодные пятна, имеющие высокую температуру нагрева. Катодное пятно является тем участком электрода, которое эмитирует (излучает) электроны. Происходит это в силу процесса термо- и автоэлектронной эмиссии, идущей с затратой энергии на выход электрона из поверхности катода, преодоления энергетического поверхностного барьера – раздела металл–газ. Электроны, разгоняясь до высоких скоростей в прикатодной зоне, попадают в столб дуги.

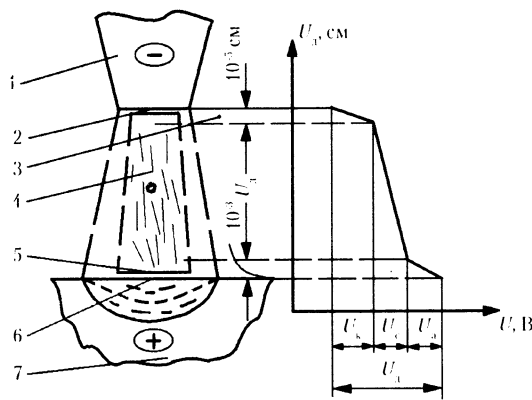


Рис. 3.1. Схема строения сварочной дуги:

- 1 – сопло; 2 – катодное пятно; 3 – катодная зона;
4 – столб дуги; 5 – анодная зона;
6 – анодное пятно; 7 – анод

Автоэлектронная эмиссия связана с созданием у поверхности катода электрического поля высокой напряженности. Оно понижает работу выхода электрона, как бы «вытягивая» его за предел металла катода. Напряжение в катодной области U_k падает до $10...20$ В, а напряженность электрического поля в ней E_k составляет до 10^6 В/см.

Электроны способны в столбе дуги ионизировать нейтральные атомы за счет так называемого «электронного удара». Образующиеся при этом положительно заряженные ионы как бы «отсасываются» к катоду под действием электрического поля, образованного падением напряжения в катодной зоне. Ударяясь о поверхность катода, ионы отдают ему энергию ионизации и кинетическую энергию, накоплен-

ную при разгоне иона в прикатодной зоне. Именно этот процесс приводит к выделению теплоты на катоде, ведущей к его нагреву и плавлению.

Таким образом, в прикатодной области текут навстречу друг другу два тока: электронный, в направлении от катода к столбу дуги, и ионный, направленный от столба к катоду. На катоде же идут два процесса: охлаждение за счет эмиссии электронов с катода (с поглощением энергии) и нагрев за счет бомбардировки катода положительно заряженными ионами. В столбе дуги также идут два процесса: образование частиц за счет ионизации и их потеря, вызванная их рекомбинацией и переходом на катод и анод. Причины ионизации газа в дуговом разряде могут быть различными.

Источником энергии, затрачиваемой на ионизацию, служит электрическое поле, напряженность $E_э$ которого в столбе дуги невелика и составляет $10...50$ В/см. Энергия поля в наибольшей мере воспринимается самыми легкими частицами – электронами, они разгоняются до энергии ионизации и производят ее «электронным ударом». Если при этом энергии электрона недостаточно для удаления электрона из нейтрального атома, то может происходить либо его возбуждение, сопровождаемое выделением энергии в виде кванта светового излучения, либо передача атому части его энергии, что ведет к повышению температуры плазмы, способствуя процессу термической ионизации. Последнее происходит при высоких температурах за счет неупругих столкновений частиц, имеющих высокую кинетическую энергию. В результате процессов ионизации в плазме в целом находится примерно одинаковое количество разноименных электрических частиц, поэтому плазма электрически нейтральна. Плазма электропроводна за счет дрейфа электронов в столбе дуги, они по сравнению с ионами более подвижны, поэтому величина электронного тока практически равна сварочному.

В области анода электроны, поступившие из столба дуги к анодному пятну, наряду с работой выхода, накапливают достаточную кинетическую энергию в прианодной зоне, которая при ударе потока электрона о поверхность анода переходит в тепловую и плавит металл анода. При падении напряжения U_a до $4...6$ В напряженность электрического поля в области анода E_a составит порядка 10^6 В/см.

Электрическая проводимость плазмы зависит от введения в нее различных веществ (например, паров металла, испаряемых при плавлении электродов), так как от этого зависит ход процесса ионизации. Сам процесс определяется понятием потенциала ионизации, который представляет собой величину работы (выраженной в электрон-

вольтах), необходимую для удаления электрона из нейтрального атома. Введение тем или иным путем (например, через покрытие) таких элементов как калий, барий, кальций приводит к понижению потенциала ионизации, облегчению зажигания дуги и стабилизирует ее горение.

С понижением или увеличением электрической проводимости плазмы связана ее температура; известно, что увеличение плотности тока в дуге увеличивает температуру плазмы. Экспериментальные исследования показывают, что температура дуг с плавящимся электродом находится в пределах 6000...8000 °С, неплавящимся (вольфрамовым) электродом 10000...15000 °С, сжатой дуги 20000...30000 °С.

Электрическая энергия в дуге преобразуется в теплоту в трех ее зонах: катодной, анодной и столбе дуги. Это количество различно в разных зонах и зависит от потенциала ионизации, соотношения ионного и электронного тока, т. е. от состава покрытия, флюса, защитного газа. По различным данным, теплота, выделяемая на электроде-катоде, составляет 10...15% от мощности дуги. Теплота, выделяемая на электроде-аноде, составляет примерно 35%, а в столбе дуги – 50...55% от общей мощности дуги. Таким образом, в зависимости от рода тока и его полярности на изделии и электроде может выделяться различное количество теплоты. Количество теплоты, выделенное на катоде, зависит в основном от потенциала ионизации дугового газа, поэтому разница в тепловыделении грубо определяется способом дуговой сварки. В реальных условиях сварки при прямой полярности (анод на изделии) глубина проплавления оказывается меньше, чем на обратной полярности (катод на изделии). Это объясняется тем, что активное анодное пятно (площадь, где происходит интенсивное выделение теплоты) занимает большую площадь, чем катодное; это определяет форму дуги (рис. 3.2) и ширину ванны и шва на прямой полярности.

Режим горения дуги определяют два параметра: сила тока и напряжение на дуге. Между напряжением на дуге и ее длиной существует практически линейная зависимость (рис. 3.3)

$$U_d = a + E_{ст} I_d,$$

где $E_{ст}$ – напряженность электрического поля в столбе дуги.

Между током и напряжением в дуге при $I_d = \text{const}$ существует связь; в ее графическом изображении в координатах ток – напряжение она представляет кривую. На графике (рис. 3.4) эта кривая, названная статической вольт-амперной характеристикой (ВАХ) дуги, изображенная в об-

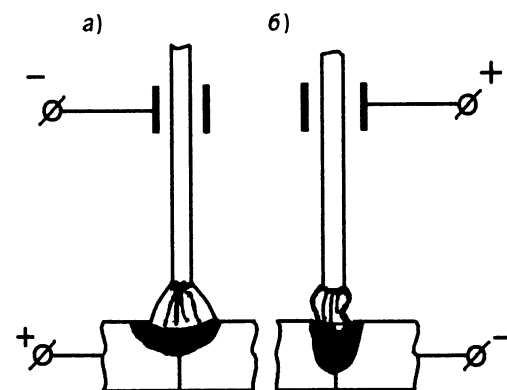


Рис. 3.2. Форма горения дуги в зависимости от полярности: а – на прямой; б – на обратной

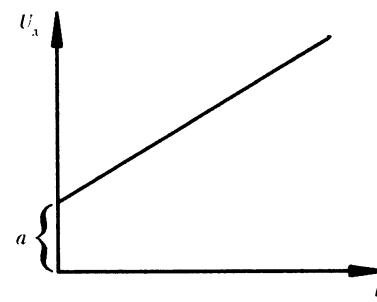


Рис. 3.3. Зависимость напряжения на дуге от ее длины

щем виде, имеет ниспадающую ветвь, ветвь, близкую к горизонтальной, и возрастающую ветвь.

Однако для конкретных случаев экспериментально удается получить лишь часть такой кривой. На рис. 3.4 показаны 3 участка. I – участок совмещенных кривых внешней падающей ВАХ источника и статической характеристики дуги обычна для ручной сварки ($U_d = 12...25$ В; $j = 5...25$ А/мм²), II – для автоматической сварки под флюсом ($U_d = 25...45$ В; $j = 40...125$ А/мм²), III – для сварки в защитных газах ($U_d = 25...45$ В; $j = 100...350$ А/мм²).

Изложенные закономерности характерны для дуг как постоянного, так и переменного тока, однако последние имеют свою специфику (рис. 3.5). Синусоидальное изменение тока при снижении напряжения

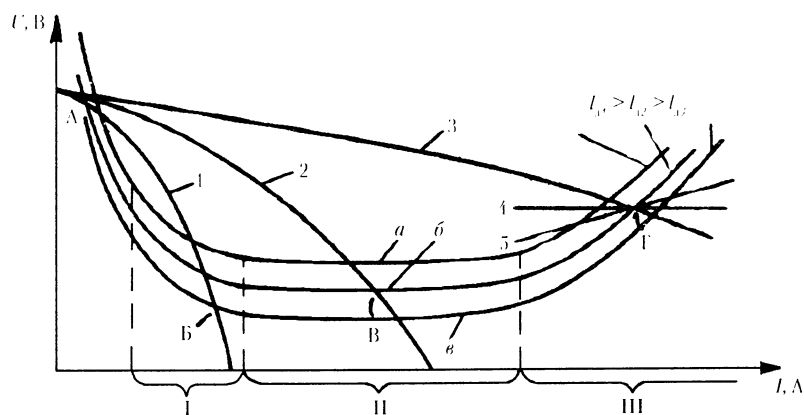


Рис. 3.4. Статические характеристики дуги и внешние характеристики источника питания (обобщающая схема):

a, б, в – статические характеристики, соответствующие дугам с длинами $l_{a1} > l_{a2} > l_{a3}$;
 1, 2, 3 – падающие внешние характеристики источника питания;
 4, 5 – жесткая и возрастающая характеристики источника питания;
 точка А – нестабильное, а точки В, В', Γ – стабильное горение дуги

менее напряжения горения дуги приводит к перерыву ее горения. Несмотря на кратковременность этого перерыва, плазма успевает остыть на несколько тысяч градусов, что требует более высокого напряжения повторного зажигания, а это ведет к перерывам горения дуги τ_n , и для стабилизации процесса сварки на переменном токе требуются специальные меры.

Скорость плавления электрода дугой (а значит и скорость его подачи в зону горения дуги) пропорциональна силе сварочного тока. Количество расплавляемого в единицу времени металла связано с величиной сварочного тока зависимостью

$$G_p = \alpha_p I_{св}.$$

где α_p – коэффициент расплавления электрода, определяемый опытным путем:

$$\alpha_p = \frac{G_p}{I_t} [\text{г/А}\cdot\text{ч}].$$

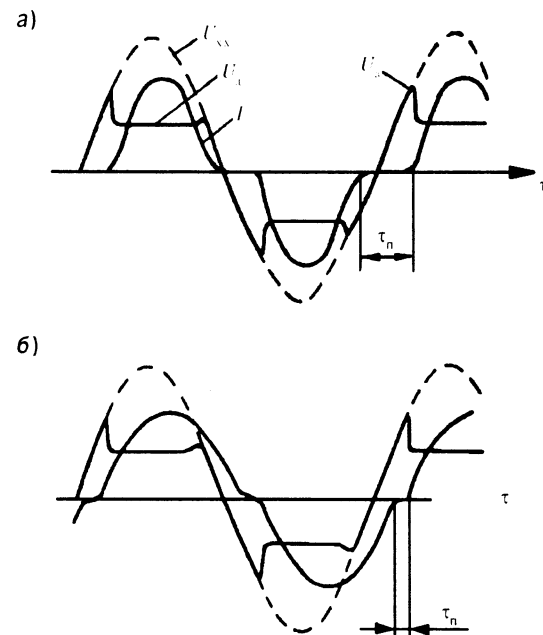


Рис. 3.5. Кривые изменения тока и напряжения на дуге при сварке на переменном токе при наличии в сварочной цепи:

a – только активного сопротивления; *б* – индуктивного сопротивления;
 U_{xx} – напряжение холостого хода; U_a – напряжение горения дуги;
 τ_n – продолжительность перерыва горения дуги

Дуга, как гибкий проводник, легко изменяет свое положение магнитным полем. Собственное электромагнитное поле дуги может отклонять ее столб вблизи больших масс металла – это так называемое магнитное дутье.

В ряде случаев это явление затрудняет сварку; приходится применять различного рода приемы, ослабляющие магнитное дутье (выполнение шва обратноступенчатым способом, стабилизация дуги путем наложения на нее постоянного электромагнитного поля с помощью соленоида и т. д.).

3.2. ТРЕБОВАНИЯ К ИСТОЧНИКАМ ПИТАНИЯ СВАРОЧНОЙ ДУГИ. ИХ ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Конструкция источника питания сварочной дуги должна быть такова, чтобы обеспечивалось статически устойчивое горение дуги. Под этим понимают способность дуги длительное время гореть без обрыва и перехода в другие формы горения. Это требование выполняется за счет электрической устойчивости системы источник-дуга; она определяется общим динамическим сопротивлением дуги и источника:

$$k_y = \frac{\partial U_{\text{д}}}{\partial I} - \frac{\partial U_{\text{и}}}{\partial I}, \quad (3.1)$$

где k_y – коэффициент статической устойчивости системы.

Условием устойчивости этой системы является $k_y > 0$. Дуга горит устойчиво в точках пересечения внешней характеристики источника со статической ВАХ дуги (см. рис. 3.4, точки *Б*, *В*, *Г*). В этих точках при случайном укорочении дуги ток и скорость расплавления электрода возрастают, а при увеличении ее длины уменьшаются. В результате дуга как бы сама восстанавливает свою длину. Это явление называют саморегулированием дуги, и математически это условие записывается уравнением (3.1).

Если плотности тока малы (ручная сварка), ВАХ должна быть крутопадающей (см. рис. 3.4, *I*), при средней плотности тока (автоматическая сварка под флюсом) крутизна ВАХ должна быть меньше (см. рис. 3.4, *II*), при высокой плотности тока, характерной для сварки плавящимся электродом малого диаметра в среде защитных газов, источник практически может иметь ВАХ любого вида (см. рис. 3.4, *III*) (рекомендуется иметь жесткую или возрастающую характеристику). Необходимым является выполнение условия статической устойчивости системы источник питания-дуга ($k_y > 0$). Однако на практике этого недостаточно. Дуга должна обладать определенным запасом эластичности, устанавливаемой по ее разрывной длине (расстоянию между электродами, при котором дуга гаснет). Естественно, чем больше разрывная длина, тем выше ее эластичность.

Величина разрывной длины дуги во многом зависит от химического состава прутка электрода, электродного покрытия, флюса, газа, рода тока, значения k_y . В случае применения переменного тока эластичность дуги, как правило, понижена, что объясняется возможнос-

тью обрыва дуги при переходе тока через ноль. Именно в это время резко снижается температура и степень ионизации плазмы (см. рис. 3.5, *а*). Необходимы специальные меры по снижению длительности перерыва горения, и одной из основных мер является увеличение индуктивного сопротивления цепи (см. рис. 3.5, *б*). Эффективным считается введение в состав покрытия или флюса элементов с низким потенциалом ионизации, что обеспечивает высокую степень ионизации во время охлаждения плазмы и снижение напряжения повторного зажигания дуги. В ряде случаев для повышения устойчивости дуги и облегчения ее зажигания на дугу с помощью осциллятора накладывают высокое напряжение переменного тока с повышенной частотой.

Важным технологическим фактором плавления электрода является характер переноса металла в дуге. Он определяет не только возможность сварки в различных пространственных положениях, но и степень разбрызгивания металла. Существует четыре вида переноса металла в дуге: короткими замыканиями (когда дуга периодически гаснет вследствие замыкания дугового промежутка образовавшейся на электроде каплей), крупнокапельный без короткого замыкания, мелкокапельный и струйный. Последний вид переноса наступает обычно при сварке плавящимся электродом в аргоне (или смеси газов) при определенной пороговой плотности тока, когда плавление электрода идет в виде мелких капель, как бы сливающихся в стекающую с торца электрода струю расплавленного металла в сварочную ванну. Этот перенос весьма стабилен и дает минимум разбрызгивания электродного металла.

Отсюда вытекают общие требования к источникам питания сварочной дуги.

1. Источник должен обеспечивать внешнюю характеристику, соответствующую статической ВАХ дуги; достаточно высокую скорость нарастания тока короткого замыкания и быстрого восстановления режима; источник переменного тока должен иметь повышенную регулируемую индуктивность сварочной цепи.
 2. Источник тока любого назначения должен иметь устройство для регулирования внешней характеристики. Если ВАХ жесткая – для изменения напряжения холостого хода; если ВАХ падающая – для изменения тока короткого замыкания.
 3. Источник для ЭПС должен иметь жесткую характеристику.
- Что касается внешних характеристик источников, то они должны выбираться в зависимости от способа сварки.

1. При автоматической сварке под флюсом:
 - применение головок с зависимой автоматической регулировкой скорости подачи проволоки требует использования внешней характеристики в ее крутопадающем виде (только в этом случае при колебаниях напряжения на дуге изменения силы тока будут небольшими, и автоматическая система с обратной связью обеспечит эффективное регулирование скорости подачи электродной проволоки);
 - применение головок с постоянной скоростью подачи требует работы с пологопадающей внешней характеристикой; здесь наиболее эффективно используется явление саморегулирования дуги.
2. При ручной сварке в рабочей области ВАХ должна быть крутопадающей; при колебаниях длины дуги для сохранения стабильного формирования шва изменения тока должны быть незначительными.

При удовлетворении указанных требований источники питания сварочной дуги могут быть классифицированы:

- по роду тока – на источники переменного и постоянного тока;
- по количеству постов, питающихся от одного источника, – на однопостовые и многопостовые;
- по виду ВАХ – на источники с крутопадающей, полнопадающей, жесткой и возрастающей характеристикой (или универсальные источники).

3.3. ИСТОЧНИКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Сварочные трансформаторы – наиболее простые и надежные в эксплуатации аппараты. Известны десятки разнообразных конструкций сварочных трансформаторов с падающими и относительно жесткими характеристиками.

На рис. 3.6 приведена принципиальная схема трансформатора большой мощности с дросселем на одном сердечнике (тип СТН – трансформаторы с повышенным магнитным рассеиванием). Дроссель обеспечивает необходимый сдвиг тока и напряжения по фазе, создает возможность получения падающей характеристики и ее регулировки с помощью подвижной части сердечника дросселя (рис. 3.6, а). Схема (рис. 3.6, б) обеспечивает эту регулировку за счет перемещения подвижной обмотки. Режимы работы трансформатора с дросселем определяются следующим образом (рис. 3.7).

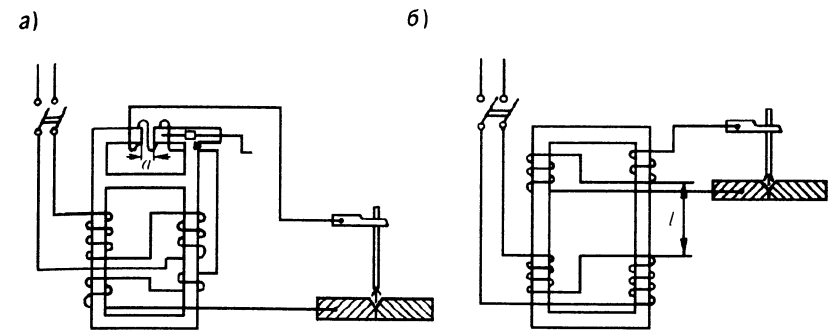


Рис. 3.6. Однофазный сварочный трансформатор:

- а – однофазный трансформатор реакторного типа с нормальным магнитным рассеиванием (с подвижным участком сердечника);
- б – трансформатор с повышенным магнитным рассеиванием (с подвижными обмотками)

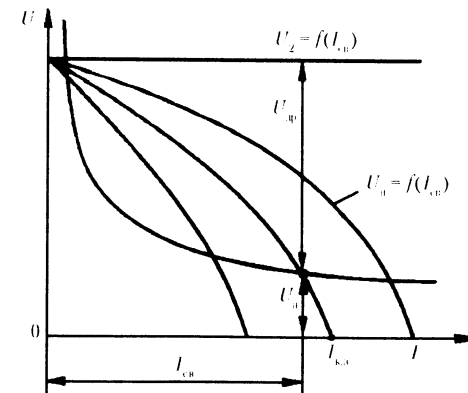


Рис. 3.7. Внешние характеристики трансформатора, определяющие режимы его работы

1. Холостой ход источника:

$$I = 0; U_{\text{х.х}} \cong U_2,$$

где U_2 – напряжение на вторичной обмотке трансформатора.

2. Рабочий режим:

$$I > 0; U_{\text{н}} = U_2 + U_{\text{др}},$$

где $U_{\text{п}}$, $U_{\text{др}}$ – падение напряжения на сварочном посту и дросселе соответственно.

Падение напряжения на дросселе определяется геометрической суммой

$$U_{\text{др}} = IR_{\text{др}} + IX_{\text{др}},$$

где $R_{\text{др}}$ – активное сопротивление дросселя, Ом;

$X_{\text{др}} = 2\pi fL$ – индуктивное сопротивление дросселя, Ом;

f – частота переменного тока, Гц;

L – коэффициент самоиндукции дросселя:

$$L = 0,4\pi W_{\text{др}} \frac{10^{-8}}{R_{\mu}} = \frac{W_{\text{др}}^2 \sigma}{R_{\mu}},$$

где $W_{\text{др}}$ – число витков дросселя; R_{μ} – магнитное сопротивление сердечника дросселя; σ – коэффициент магнитного рассеивания.

Отсюда следует, что с увеличением силы тока уменьшается напряжение на посту, что дает падающую внешнюю характеристику.

3. Режим короткого замыкания:

$$U_{\text{п}} = U_2 - U_{\text{др}} \approx 0.$$

Отсюда при коротком замыкании

$$U_2 - I_{\text{к.з}} 2\pi fL \approx 0,$$

и ток короткого замыкания

$$I_{\text{к.з}} = \frac{U_2}{2\pi fL} = \frac{U_2 R_{\mu}}{2\pi f W_{\text{др}}^2 \sigma}.$$

Анализ этого выражения показывает, что ток короткого замыкания можно регулировать двумя путями: изменением количества витков дросселя или изменением магнитного сопротивления его сердечника ($W_{\text{др}}$ и R_{μ} соответственно). Конструктивно проще регулировать R_{μ} . Оно регулируется изменением зазора путем перемещения подвижной части сердечника. Как это видно из рис. 3.6, а, магнитное сопротивление сердечника изменяется с изменением зазора a магнитопровода сердечника. Существуют и другие схемы изменения R_{μ} . Например, путем регулирования подмагничивания

сердечника установкой на нем дополнительной катушки, питаемой внешним источником постоянного тока (дросселем насыщения). Здесь уменьшение R_{μ} достигается уменьшением значений постоянного тока в дополнительной обмотке подмагничивания и создаваемого ею постоянного магнитного потока. Положительными сторонами такого варианта является отсутствие подвижных частей и простота дистанционного управления внешней характеристикой.

Заметное распространение получили трансформаторы с развитым магнитным рассеиванием. Здесь падающая характеристика создается благодаря увеличенному и регулируемому по величине индуктивному сопротивлению трансформатора. Это трансформаторы либо с подвижными обмотками (см. рис. 3.6, б), либо с подмагничиванием сердечника. У первых регулируется расстояние между первичной и вторичной обмотками (с увеличением расстояния увеличивается магнитный поток рассеивания, и напряжение на вторичной обмотке падает). У второго типа магнитное рассеивание достигается путем насыщения магнитопровода постоянным магнитным потоком от дополнительной обмотки. Изменением тока в этой обмотке изменяется форма внешней характеристики.

Современная промышленность выпускает широкую номенклатуру различных марок трансформаторов для дуговой сварки. Они предназначены для сварки, резки и наплавки на переменном токе стальных металлоконструкций покрытыми штучными электродами в различных условиях.

К малогабаритным можно отнести трансформаторы марок ТДМ-121 ($I_{\text{св}} = 40...140$ А); ТДМ-169 ($I_{\text{св}} = 80...170$ А) и т. д. К более мощным трансформаторам относятся ТДМ-300 ($I_{\text{св}} = 80...320$ А); ТДМ-504 ($I_{\text{св}} = 90...500$ А) и др.

Для автоматической сварки под флюсом применяются трансформаторы с тиристорным регулированием с жесткими (пологопадающими) внешними характеристиками. Примерами могут служить ТДФЖ-1002 ($I_{\text{св}} = 300...1200$ А) и ТДФЖ-2002 ($I_{\text{св}} = 600...2200$ А).

3.4. ИСТОЧНИКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Источники постоянного тока можно классифицировать, с одной стороны, как электромашинные преобразователи и выпрямители, а с

другой – как однопостовые и многопостовые (ими могут быть и машинные преобразователи, и выпрямители).

Однопостовые электромашинные преобразователи с падающей характеристикой представляют собой агрегат, состоящий из однопостового сварочного генератора на одном валу с приводным электродвигателем, смонтированными в одном корпусе. Электрическая схема такого преобразователя с независимой обмоткой возбуждения приведена на рис. 3.8.

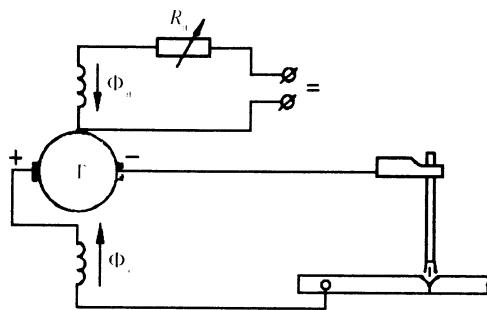


Рис. 3.8. Принципиальная электрическая схема однопостового электромашинного преобразователя (сварочного генератора) постоянного тока с независимым возбуждением

Здесь обмотка независимого возбуждения и последовательная (серьезная) обмотка включены так, что образуемые ими магнитные потоки Φ_n и Φ_c направлены друг против друга. Так как величина Φ_n в процессе сварки постоянна, а величина Φ_c пропорциональна сварному току (в определенных пределах зависящему от длины дуги), то индуцируемая в якоре генератора электродвижущая сила E возбуждается суммарным потоком:

$$E = C(\Phi_n - \Phi_c) = \frac{C}{\sum R_m} (i_n W_n - I_{cb} W_c),$$

где

$$\Phi_n = \frac{i_n W_n}{\sum R_m} - \text{магнитный поток в воздушном зазоре, создаваемый}$$

независимой обмоткой возбуждения;

$$\Phi_c = \frac{I_{cb} W_c}{\sum R_m} - \text{магнитный поток в воздушном зазоре, создаваемый}$$

последовательной обмоткой возбуждения;

$\sum R_m$ – магнитное сопротивление магнитопровода генератора (полюсов, якоря, воздушного зазора, корпуса), А/Вб; i_n – сила тока независимой обмотки, А; W_n – число витков обмотки независимого возбуждения; I_{cb} – сила сварочного тока, А; W_c – число витков последовательной обмотки.

Постоянная C зависит от ряда факторов:

$$C = \frac{PnN}{60a} \cdot 10^{-8},$$

где P – число пар полюсов; n – число оборотов в минуту; N – число активных проводников в якоре; a – число параллельных ветвей в обмотке якоря.

Режим работы генератора определяется следующими зависимостями.

1. Холостой ход:

$$\left. \begin{aligned} I_{cb} &= 0; \\ U_{x,x} = E &= \frac{C}{\sum R_m} i_n W_n, \end{aligned} \right\}$$

где R_m – магнитное сопротивление статора и якоря.

2. Рабочий режим:

$$I_{cb} \neq 0;$$

$$U_p = E - I_{cb} R_a = \frac{C}{\sum R_m} (i_n W_n - I_{cb} W_c) - I_{cb} R_a,$$

где R_a – внутреннее сопротивление генератора (якоря, последовательной обмотки, переходного сопротивления щеток и т. д.).

3. Режим короткого замыкания:

$$\frac{C}{\sum R_m} (i_n W_n - I_{кз} W_c) - I_{кз} R_a \approx 0.$$

При коротком замыкании резко возрастает поток Φ_c , что значительно уменьшает результирующий поток; ЭДС, индуцируемая в якоре, резко падает и практически вся расходуется на падение напряжения во внутренней цепи – напряжение на зажимах генератора приближается к нулю, и это ограничивает ток короткого замыкания величиной

$$I_{к.з} = \frac{\frac{C}{\sum R_m} i_{II} W_{II}}{R_a + \frac{C}{\sum R_m} W_c}$$

Из этого выражения можно заключить, что величину силы тока короткого замыкания, а значит, и величину сварочного тока рабочего режима можно регулировать следующими способами:

- силой тока в обмотке независимого возбуждения (посредством реостата R_{II});
- числом витков в обмотке независимого возбуждения;
- числом витков в последовательной обмотке.

Наиболее простым способом является регулировка силы тока в обмотке независимого возбуждения с помощью реостата R_{II} (см. рис. 3.8). Большее распространение получили генераторы с самовозбуждением, у которых независимая обмотка подключена к главной через дополнительную щетку якоря генератора (ПС-500). Выпускаются также сварочные генераторы с развитой реакцией якоря, за счет этого создается падающая характеристика (ПС-300, ПС-300М).

Если включить обмотки генератора так, чтобы их магнитные потоки были направлены в одну сторону, то это обеспечит жесткую или возрастающую ВАХ (ПСГ-350, ПСГ-500, ГД-2001, ГД-4004, ГД-5001 и т. д.). Существуют универсальные преобразователи, которые предусматривают возможность изменения витков последовательной обмотки и согласное включение обеих обмоток, что обеспечивает переход от падающей характеристики различной крутизны к жесткой (ПСУ-500), возможны и другие варианты (ПСУ-300). Электромашинные преобразователи обеспечивают стабильное горение сварочной дуги, но требуют тщательного ухода во время эксплуатации (притирка щеток, смазка подшипников).

В последнее десятилетие постепенно выпуск электромашинных преобразователей значительно сократился и им на смену пришли *свароч-*

ные выпрямители. Исключением являются работающие в полевых условиях и состоящие из двигателя внутреннего сгорания и сидящего на его валу генератора. Выпрямитель состоит обычно из одно- или трехфазного (рис. 3.9) трансформатора (I), устройства для регулирования тока и внешней характеристики – дросселя (II) и блока полупроводниковых выпрямителей – вентилей (III). У выпрямителя с трехфазным трансформатором в каждую шестую часть периода включаются поочередные пары вентилей (1 и 5, 2 и 4, 3 и 6 и т. д.), в результате чего на выходе получается пульсирующий постоянный ток (300 Гц). Для получения падающей характеристики и ее регулирования служат индуктивные сопротивления – дроссели (II).

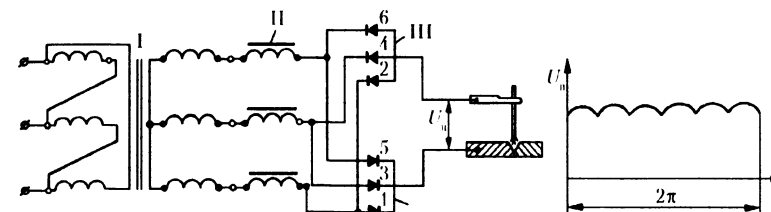


Рис. 3.9. Принципиальные схемы трехфазного сварочного выпрямителя

И выпрямители, и машинные преобразователи могут быть и *многопостовыми* (т. е. служить для питания нескольких дуг). В этом случае на выходе источник тока имеет жесткую ВАХ (рис. 3.10, I).

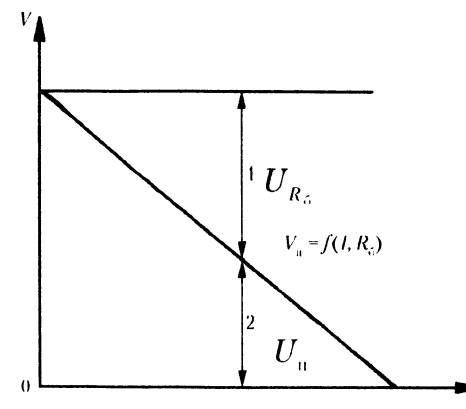


Рис. 3.10. Внешние характеристики многопостового выпрямителя

Для создания падающей характеристики на посту 2 в цепь, последовательно с дугой, включается балластный реостат (активное омическое сопротивление R_0). Он же служит для регулировки силы тока на данном сварочном посту. Примером многопостового электромашиного преобразователя служит ЕДУ02502 (снят с производства), многопостового выпрямителя ВДМ-3001 и ВДМ-1201. Из современных однопостовых сварочных выпрямителей распространены универсальные тиристорные выпрямители ВДУ-505, ВДУ-506, ВДУ-1202, ВДУ-306.

В последнее время получили распространение инверторные источники питания с преобразованием частоты. В них регулировка мощности производится изменением частоты и регулировкой емкости рабочих конденсаторов. Такие источники имеют малые габариты и массу. Величина сварочного тока, получаемого от таких источников, достигает 500 А, что вполне достаточно для наиболее распространенных способов дуговой сварки. Подобный источник – INVERTEC V-4001, предназначенный для дуговой сварки штучными и неплавящимися электродами с возможностью создания режимов импульсной сварки на токах до 400 А (выпускает завод «Электрик»).

Современные источники питания зарубежных фирм в достаточной мере универсальны, способны легко регулировать режимы сварки и настраиваться на любые характеристики. В современных универсальных источниках питания предусмотрены схемы, обеспечивающие питание дуги при сварке плавящимися и неплавящимися электродами импульсным током. В этом случае процесс сварки происходит при непрерывно горящей маломощной дуге (дежурной) и периодически зажигающейся импульсами тока мощной дуге.

Для обеспеченного первоначального и повторного зажигания дуги (например, при сварке вольфрамовым электродом, плазменной сварке и резке и т. д.) применяют искровые осцилляторы и импульсные генераторы, использующие накопительные емкости, которые заряжаются от специального зарядного устройства и разряжаются в момент повторного возбуждения дуги.

Сравнительные технико-экономические характеристики различных типов источников приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Сравнение технико-экономических показателей различных типов источников для дуговой сварки

Технико-экономические показатели	Источники постоянного тока		Источники переменного тока – трансформаторы
	Преобразователи	Выпрямители	
Затраты на изготовление, %	100	75	50
Масса, %	100	60	50
Обслуживание	Трудоемкое	Нетрудоемкое	Нетрудоемкое
КПД	0,45–0,65	0,5–0,75	0,6–0,8
$\cos\varphi$	0,7–0,9	0,3–0,75	0,3–0,6
Потери холостого хода, кВт	1,6–3,2	0,3–0,8	0,4–0,9
Уровень шума	Высокий	Низкий	Низкий
Чувствительность к перегрузкам	Нечувствителен	Средняя чувствительность	Нечувствителен
Потери мощности, %, при колебании напряжения в сети $\pm 8\%$	10–15	16–28	18–35

3.5. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СВАРОЧНЫХ ГОЛОВОК ДЛЯ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ СПОСОБОВ СВАРКИ

Любая разновидность процесса дуговой сварки связана с последовательным выполнением ряда операций: зажигания дуги; подачи в зону сварки электрода (проволоки, присадки), защитного газа, флюса; стабильного поддержания заданных режимом параметров (тока, напряжения); перемещения дуги вдоль свариваемых кромок с заданной скоростью; заварки кратера при прекращении процесса сварки. При ручной сварке все эти операции выполняются рабочим-сварщиком, при автоматической сварке все операции выполняет автомат, при полуавтоматической сварке дугу вдоль шва передвигает сварщик.

Остальные операции выполняются автоматически. Автомат (или полуавтомат) входит в состав сварочной установки, а в состав любого автомата (полуавтомата) входит в качестве основного узла сварочная головка, осуществляющая подачу электродной проволоки в зону горения дуги. Для стабильного процесса сварки в этом случае необходимо соблюдение условия

$$v_{пл} = v_{пр}$$

где $v_{пл}$ – скорость подачи электродной проволоки; $v_{пр}$ – скорость ее плавления.

Скорость плавления, по И. Я. Рабиновичу, приближенно определяется как

$$v_{пл} = k_{сг} I_{св} - k_{сн} U_d$$

где $k_{сг}$ – коэффициент саморегулирования дуги по току, см/с·А; $k_{сн}$ – коэффициент саморегулирования дуги по напряжению, см/с·В.

В настоящее время все механизированные установки для сварки (включая роботизированные системы) оснащаются двумя типами головок для подачи электродной проволоки:

1) система, основанная на саморегулировании дуги – с постоянной скоростью подачи проволоки $v_{пл} = \text{const}$ (предложена В. И. Дятловым в 1942 г.);

2) система, основанная на принудительном регулировании скорости подачи электродной проволоки по изменению напряжения на дуге $v_{пл} = f(U_d)$.

Сварочные головки, работающие по принципу регулируемой скорости подачи проволоки, имеют двигатель постоянного тока и систему обратной связи, заключающуюся в том, что при изменении длины дуги (а значит и напряжения на дуге) увеличиваются (или уменьшаются) обороты якоря двигателя, увеличивая (или уменьшая) скорость подачи проволоки, приводя ее в соответствие с критерием стабильности процесса ($v_{пл} = v_{пр}$). Принципиальная упрощенная электрическая схема такой головки приведена на рис. 3.11, а. Двигатель M , вращающий через редуктор ролики подающего механизма, своей обмоткой возбуждения подключен к независимому источнику питания, а его якорь подключен параллельно дуге (при питании переменным током через выпрямитель). При заданном режиме сварки двигатель обеспечивает постоянную равномерную скорость подачи проволоки в зону сварки. При случайном увеличении

длины дуги возрастет напряжение на якоре двигателя, увеличатся его обороты и увеличится скорость подачи проволоки, доведя длину дуги до заданной. Обратный процесс происходит при случайном уменьшении длины дуги. Для настройки нужного режима по скорости подачи служит реостат; с его помощью изменяют величину напряжения на якоре двигателя, число его оборотов и скорость подачи проволоки.

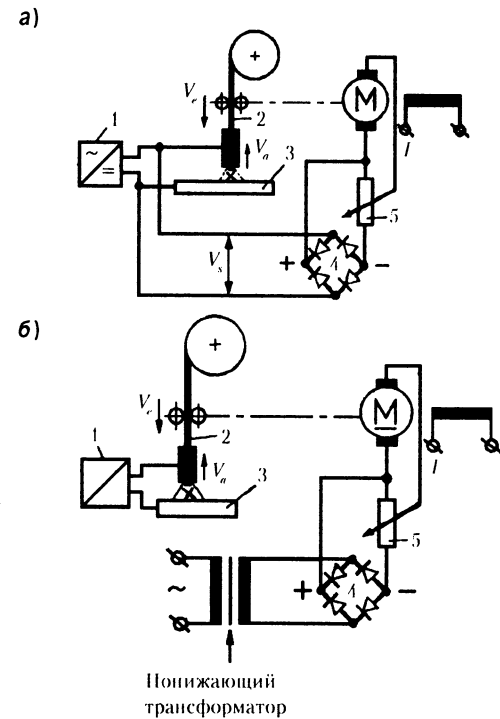


Рис. 3.11. Принципиальная схема головки:

- а – с подачей электродной проволоки в зависимости от напряжения на дуге;
 б – с постоянной подачей электродной проволоки (принцип саморегулирования);
 1 – источник питания; 2 – механизм, подающий проволоку; 3 – свариваемое изделие;
 4 – выпрямительный блок; 5 – реостат регулировки напряжения на якоре двигателя (числа оборотов двигателя)

Собственно схема работы головки повторяет порядок операций, производимых при ручной сварке. Однако такой принцип построения головки приводит, например, к тому, что автомат должен иметь два двигателя: один для подачи проволоки, другой для привода каретки.

Второй тип головок – с постоянной скоростью подачи (рис. 3.11, б) – возник после открытия явления саморегулирования дуги. Электродвигатель M имеет независимое питание якоря, а намагничивающая обмотка питается отдельно с регулируемым напряжением, что позволяет регулировать скорость подачи проволоки при установлении режима в довольно широких пределах. В промышленности широко распространен тип головок, приводимых в действие асинхронным двигателем переменного тока. Установление нужной для данного режима скорости подачи производится сменой пар шестеренок в редукторе. Здесь один и тот же двигатель может служить двум целям: для подачи проволоки в зону дуги и для передвижения каретки автомата вдоль свариваемого стыка. В выбранном режиме проволока подается в зону дуги с постоянной скоростью, и колебания длины дуги не изменяют число оборотов двигателя.

Стабильный режим сварки обеспечивается за счет явления саморегулирования дуги. Путем саморегулирования, при $v_{пл} = \text{const}$, удастся сохранить заданные изначально параметры режима сварки, обеспечив критерий стабильности процесса ($v_{пл} = v_{пл}$). Само явление заключается в том, что при случайных нарушениях длины дуги в связи с изменением силы сварочного тока $I_{св}$ и напряжения на дуге U_d самопроизвольно изменяется и скорость плавления проволоки $v_{пл}$. Каждой фиксированной скорости подачи электродной проволоки соответствует свой режим горения дуги, при котором скорость подачи равна скорости плавления.

Качественно механизм саморегулирования можно представить следующим образом. Даже при небольшом изменении длины дуги меняются режим плавления электрода и две вышеназванные скорости. В результате длина дугового промежутка восстанавливается. Скорость этого восстановления

$$\frac{\partial l_d}{\partial t} = v_{пл,н} - v_{пл,в}$$

где l_d – длина дуги.

Если режим сварки задан параметрами $I_{св0}$ и U_0 , что соответствует точке стабильного горения дуги A_0 в точке пересечения ВАХ ($U_{св} = f(I)$) и статической ВАХ дуги $U_d = f(I, l_d)$, то этому режиму соответствует скорость плавления электродной проволоки $U_{пл0}$ (рис. 3.12).

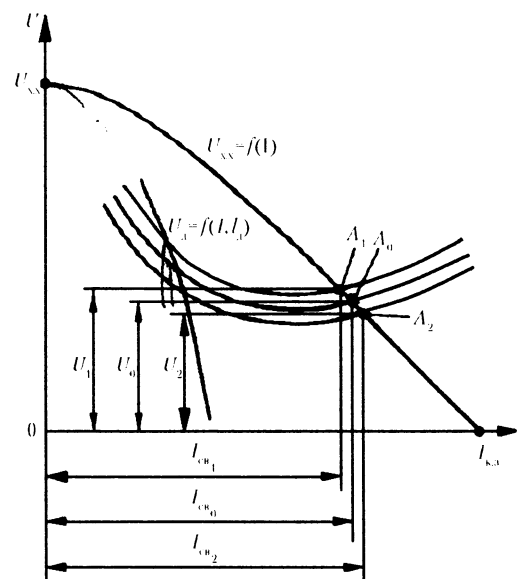


Рис. 3.12. Зависимость изменения сварочного тока и напряжения на дуге при колебании длины дуги и неизменной ВАХ источника

Предположим, что по какой-то причине длина дуги изменилась (например, случайный подъем сварщиком головки полуавтомата). При этом статическая ВАХ дуги, соответствующая новой увеличенной длине дуги, эквидистантно займет новое положение с точкой пересечения A_1 (см. рис. 3.12). Видно, что при переходе точки устойчивого равновесия A_0 в точку A_1 ($I_{св} > I_{св}$) происходит уменьшение сварочного тока ($I_{св1} < I_{св0}$) и увеличение напряжения дуги ($U_1 > U_0$). Такое изменение тока и напряжения приводит к уменьшению количества выделяемой в дуге теплоты и, как следствие, уменьшению скорости плавления электродной проволоки (см. зависимость $v_{пл}$ от параметров режима). Здесь замедление скорости плавления при $v_{пл} = \text{const}$ приводит к восстановлению первоначально заданной длины дуги

($\frac{\partial l_d}{\partial t} < 0$) и параметров режима $I_{св}$ и U_0 . Если по какой-то случайной причине режим устойчивого горения переместится в точку A_2 , то наступит увеличение сварочного тока ($I_{св2} > I_{св0}$) и уменьшение напряжения на дуге ($U_2 < U_0$), увеличится количество выделяемой в дуге теплоты и, как следствие этого, возрастет скорость плавления

электродной проволоки ($\tau_{н.12} = \tau_{н.10}$), что восстановит заданную длину дуги ($\frac{\partial l_1}{\partial t} > 0$) и первоначально установленные параметры режима сварки $I_{св0}$ и U_0 .

Этот краткий качественный анализ показывает, что процесс саморегулирования происходит тем энергичнее, чем больше меняется величина сварочного тока при отклонении длины дуги на одну и ту же величину, что характерно для более пологих внешних характеристик источника питания. Отсюда следует вывод о том, что головки, построенные по первому принципу (принудительного регулирования), хорошо работают с источником, имеющим крутопадающие внешние характеристики, головки с постоянной скоростью подачи — с пологопадающими и жесткими ВАХ.

Система саморегулирования весьма надежна при высоких плотностях тока (проволока диаметром 1,0...3,0 мм) и при колебаниях напряжения в питающей сети до 8%. Определенным недостатком этой системы является нарушение ее действия при различных возмущениях (резкое изменение длины дуги из-за неровности изделия, изменение вылета электрода, резкие колебания напряжения в питающей сети и др.). Система с принудительным регулированием скорости подачи рациональна при относительно небольших плотностях тока (диаметр электродной проволоки 4,0...6,0 мм в диапазоне токов 400...700 А). Поэтому головки системы с саморегулированием целесообразно использовать при автоматической и полуавтоматической сварке под флюсом и в CO_2 при малых диаметрах проволок 1,0...2,0 мм и в роботизированных комплексах, а систему с принудительным регулированием — в автоматах для сварки под флюсом при диаметре электродной проволоки 4,0 мм и выше.

3.6. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ СТАЛЕЙ МЕХАНИЗИРОВАННЫМИ СПОСОБАМИ

Оборудование для сварки под флюсом

Наибольшее распространение в судостроении получили автоматы тракторного типа, перемещающиеся непосредственно по изделию. Здесь механизированы две основные операции: подача электродной проволоки в зону горения дуги и перемещение дуги по линии сварного

соединения. Такие автоматы предназначены для сварки прямолинейных протяженных сварных соединений (как стыковых, так и тавровых) и делятся на два типа, в соответствии с типами головок для механизированной подачи электродной проволоки. К первому относятся автоматы со скоростью подачи электродной проволоки в зависимости от напряжения на сварочной дуге. Наиболее известны из них, выпускаемые отечественной промышленностью (завод «Электрик»), автоматы АДФ-1000* (рис. 3.13), предназначенные для сварки на постоянном токе до значений 1000 А. От ранее выпускаемых автоматов серии АДС они отличаются более современной схемой управления и конструктивным оформлением трактора. На каретке такого трактора установлен двигатель для его перемещения, пульт управления, на котором размещены приборы контроля параметров режима сварки ($I_{св}$ и $U_д$, $\tau_{св}$), кассета с запасом электродной проволоки, бункер с флюсом и сварочная головка, имеющая механизм подачи электродной проволоки и токоподвод.

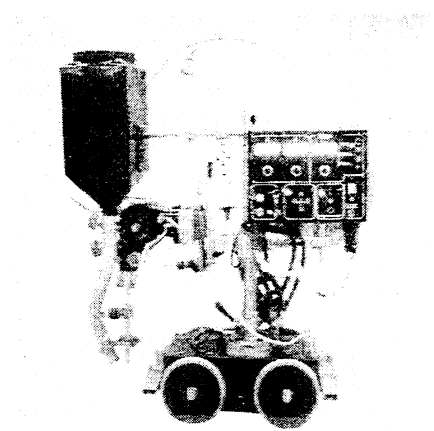


Рис. 3.13. Общий вид автомата АДФ-1000 для сварки под флюсом швов стыковых соединений

Автоматы второго типа, более простой конструкции, работают с головками постоянной скорости подачи электродной проволоки с явле-

* Автоматы имеют сварочную головку, устанавливаемую в любое пространственное положение.

нием саморегулирования дуги. В них имеется один низковольтный асинхронный двигатель переменного тока, осуществляющий одновременно перемещение трактора и подачу электродной проволоки в зону горения дуги с постоянной скоростью. Скорости подачи проволоки и перемещения каретки могут ступенчато регулироваться сменой пар шестерен.

Такие тракторы конструкции Института электросварки им. Е. О. Патона (г. Киев) имеют разное конструктивное выполнение. Они могут быть однодуговыми (ТС-17 МУ/3, ТС-44) и двухдуговыми (ДТС-45). Есть вариант трактора для сварки угловых швов (ТС-17Р). Для односторонней сварки под флюсом прямолинейных швов в судостроении применяют автомат «Бриг» с формированием однопроходного шва с помощью обратного медного ползуна.

ЦНИИ ТС с учетом специфики судостроительных конструкций разработал трактор типа АСУ-5А (рис. 3.14). Трактор имеет два двигателя и предназначен для сварки тавровых соединений при высоте вертикальной стенки более 40 мм.

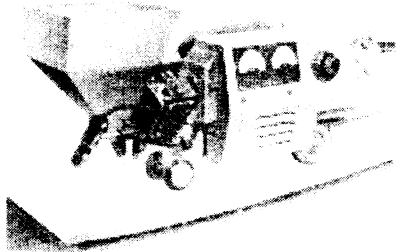


Рис. 3.14. Общий вид автомата АСУ-5М для сварки под флюсом прямолинейных и кольцевых (с радиусом кривизны не менее 1,5 м) швов угловых соединений

Автоматы для сварки в защитных газах

Принцип конструктивного построения автоматов тракторного типа для этого способа сварки аналогичен аппаратам для сварки под флюсом. Учитывая, что большинство автоматов рассчитано на сварку тонкой электродной проволокой диаметром 0,8...3,0 мм, при которой достаточно велики плотности тока и эффективно идет процесс саморегулирования, головки для подачи электродной проволоки построены по принципу постоянной скорости подачи.

Конструктивным отличием установки является наличие газоподводящей системы. Газ (Ar, He, CO₂ или их смеси) подается из балло-

нов через понижающий давление редуктор, через систему гибких шлангов в горелку, служащую для вытеснения защитным газом воздуха из района плавления металла. В оборудовании для сварки в защитных газах (CO₂, Ar) используется автомат для сварки плавящимся электродом сталей и цветных металлов стыковых и угловых швов в нижнем положении (рис. 3.15).

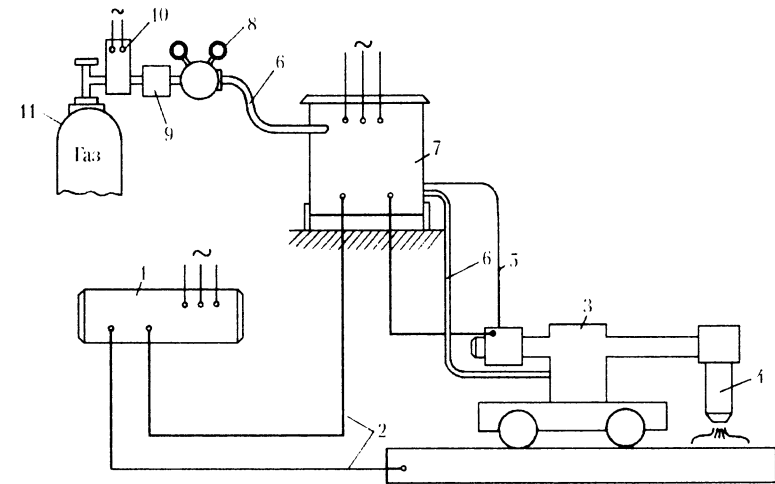


Рис. 3.15. Схема установки для автоматической сварки в защитных газах:

- 1 - источник сварочного тока; 2 - сварочные провода; 3 - сварочный трактор;
- 4 - сварочная горелка; 5 - кабель управления; 6 - газовый шланг;
- 7 - шкаф управления; 8 - редуктор с расходомером; 9 - осушитель газа;
- 10 - подогреватель газа; 11 - баллон с газом

У этого автомата скорости подачи электродной проволоки и скорости сварки регулируются плавно. Он может выполнять сварку как стыковых, так и угловых швов в различных газах (Ar, He, CO₂ и их смесях). В судостроении применялись автоматы РИТМ-26 для вертикальной сварки в среде защитных газов с принудительным формированием шва. Этот автомат движется по зубчатой рейке, установленной на изделии (или стенде), а шов формируется в зазоре между кромками деталей в объеме, ограниченном с одной стороны неподвижной медной подкладкой, с другой стороны - подвижным ползуном, закрепленным на движущейся вверх каретке автомата.

Оборудование для полуавтоматической сварки

Для дуговой сварки сталей различными способами (под флюсом и в среде защитных газов) применяют шланговые полуавтоматы с подающими механизмами толкающего типа, предназначенные для сварки тонкой проволокой (0,8...2,5 мм). Такого рода установки имеют разнообразные конструктивные исполнения в зависимости от фирмы-изготовителя. Однако структурное их построение примерно одинаково. Они состоят из источника питания, подающего механизма, гибкого шланга и сварочной горелки для плавящегося или неплавящегося электрода.

В последнее время полуавтоматы для сварки под флюсом практически не выпускаются промышленностью; их заменили полуавтоматы для сварки в защитных газах, изготавливаемые многими отечественными и зарубежными фирмами в различных модификациях. Одной из основных частей таких установок являются гибкие шланги (рис. 3.16), предназначенные для подачи электродной проволоки малого диаметра в сварочную горелку.

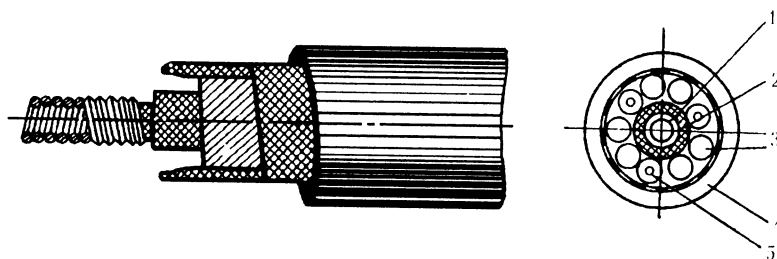


Рис. 3.16. Устройство гибкого шланга полуавтомата:

- 1 – стальная спираль; 2 – изоляция спирали; 3 – жилы сварочного кабеля;
4 – гибкая резиновая трубка; 5 – провода управления

Внутри шланга проходит стальная спираль для подачи электродной проволоки. Часто внутри нее находится трубка из гибкой пластмассы, предназначенная для уменьшения трения движущейся электродной проволоки и повышения стабильности подачи проволоки при изгибах шланга. Спираль покрыта изоляцией, поверх которой расположены гибкие жилки сварочного кабеля и провода управления. Если шланг предназначен для полуавтомата, служащего для сварки в защитных газах, здесь же проходит трубка, подающая газ в горелку. Все эти элементы покрыты изоляционным слоем и размещены в резиновой трубке, образующей гибкий шланг. Газоподводящий шланг может быть подведен отдельно и скреплен с основным шлангом. В зависимости от

используемой силы тока, шланг заканчивается сварочной головкой с воздушным охлаждением при сварке проволокой диаметром 0,8...1,4 мм на токах до 150 А или с водяным охлаждением при сварке проволокой диаметром 1,6...2,0 мм на токах до 500 А. Длина гибкого шланга колеблется от 2,5 до 4,0 м.

Примерами таких полуавтоматов являются ПДГ-200, ПДГ-351, «Гранит», выпускавшиеся отечественной промышленностью. В настоящее время судостроительные заводы часто используют импортные полуавтоматы различных фирм (например, фирмы «КЕМПИ»), которые обладают достаточной универсальностью, позволяя производить сварку в защитных газах и их смесях в широком диапазоне режимов как постоянно горячей, так и импульсной дугой. Источники тока таких полуавтоматов позволяют вести сварку как неплавящимся, так и плавящимся электродом (при соответствующей замене сварочных горелок) и предназначены для сварки различных материалов (сталей различного класса, алюминиевых сплавов и т. д.). При сварке неплавящимся электродом необходимость в гибких шлангах подачи проволоки отпадает, изменяются и комплектующие инструменты горелки.

Многолетний опыт применения различных по конструкции автоматов, построенных на перечисленных принципах головок для подачи электродной проволоки, показал, что качество выполненных швов не всегда соответствует нормативным требованиям. Виной этому служат низкая точность вырезаемых деталей (что делает необходимым подгонку для соблюдения нормативных требований по конструктивным параметрам подготовки кромок) и невозможность изменения параметров режимов, что приводит к появлению прожогов, непроваров, уменьшению сечения шва и часто требует дорогостоящего ремонта швов с последующим их контролем.

Поэтому в последнее десятилетие особенно активизировались работы по созданию автоматов с числовым программным управлением (ЧПУ). Такие автоматы обеспечивают полный объем автоматизации многих операций. Они позволяют считывать размеры разделки кромок в каждом сечении соединения с передачей этих сигналов в программное устройство автомата. Это устройство обеспечивает автоматический выбор сварочного тока, напряжения дуги и скорости сварки в зависимости от изменения считываемых параметров; направление дуги по стыку с заданной точностью; производит включение и поддержку режима сварки, а также выключение тока и подачи газа при окончании сварки. Такой автомат для двудуговой сварки под флюсом типа «Мир»

был создан ЦНИИ ТС*. Он обеспечивает автоматическое управление процессом электродуговой сварки плавящимся электродом по возмущениям, связанным с отклонениями размеров и положения подготовленного под сварку стыка от некоторых средних значений.

Опыт применения такого оборудования однозначно свидетельствует о том, что созданное программное обеспечение позволяет значительно улучшить качество сварных швов, уменьшить объем ремонтных работ. Поэтому переход на программно-управляемую технологию автоматической сварки с использованием автоматов с ЧПУ типа «Мир» (или подобных ему) представляется, несомненно, перспективным.

В то же время, в промышленно развитых странах для выполнения различных технологических процессов, в том числе и для сварки, все чаще используют роботов. Особые требования, предъявляемые к сварке судовых корпусных конструкций, побудили ЦНИИ ТС к созданию семейства сварочных роботов с учетом судостроительной специфики. Так, промышленный робот «Луч-01» предназначен для электродуговой сварки плавящимся электродом диаметром 1,2...1,6 мм в CO_2 или в смеси кислородсодержащих газов. Обслуживая зону $570 \times 600 \times 1800$ мм, робот обеспечивает возможность непрерывной и прерывистой сварки швов с колебаниями (и без них) сварочной горелки в нижнем и вертикальном положении. Система управления манипулятором – контурного типа с линейной интерполяцией без обратной связи по скорости и положению, программирование осуществляется методом обучения. На базе этого робота разработан технологический комплекс на две рабочие позиции с движением между ними робота на специальной транспортной системе.

Промышленный робот «РМ-01» предназначен для электродуговой сварки в CO_2 электродной проволокой диаметром 1,2...1,4 мм судовых конструкций. Робот имеет манипулятор, представляющий собой многозвенный механизм с шестью степенями подвижности, работающий в сферической системе координат. Программирование выполняется путем ввода с клавиатуры видеотерминала и записи в ОЗУ инструкций, предназначенных для управления роботом (с записью на гибкий магнитный диск для возможности повторного использования). Пульт ручного управления используется для обучения

* Горбач В. Д. Программируемые параметры технологии автоматической электродуговой сварки с числовым программным управлением: Сб. реф. ДР/ВИМН. Вып. 2. ДР-3711. С. 8.

робота по программируемым точкам позиционирования. Программирование производится в диалоговом режиме на робото-ориентированном языке высокого уровня ARPS.

Существует портальный сварочный робот для электродуговой сварки плавящимся электродом в CO_2 проволокой малого диаметра угловых швов тавровых соединений судовых корпусных конструкций с высотой набора не более 250 мм. Здесь в качестве манипулятора использована механическая часть машины для тепловой резки с ЧПУ типа «Гранит» – ТПл-2,5, которая оборудована сварочной головкой со степенями подвижности и серийными УЧПУ.

Применение роботов для сварки в судостроении может резко сократить использование ручного труда и повысить качество сварных швов, однако, в каждом конкретном случае, с учетом изготавливаемых конструкций, необходима тщательная технико-экономическая проработка проекта.

4. СТРУКТУРА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Любое сварное соединение, выполняемое сваркой плавлением, нарушает структурную однородность прокатного, ковального или литого металла, который может применяться для сварной конструкции. Такое сварное соединение имеет четыре степени неоднородности. В сварном соединении следует различать 3 зоны (рис. 4.1): I – литой металл шва, представляющий собой сплав наплавленного (электродного) и расплавленного основного металлов; II – ЗТВ, представляющая собой «сэндвич» различных структур, образовавшихся в основном металле в результате сварочного нагрева; III – не измененная нагревом текстура основного металла. Отсюда определяются и степени неоднородности.

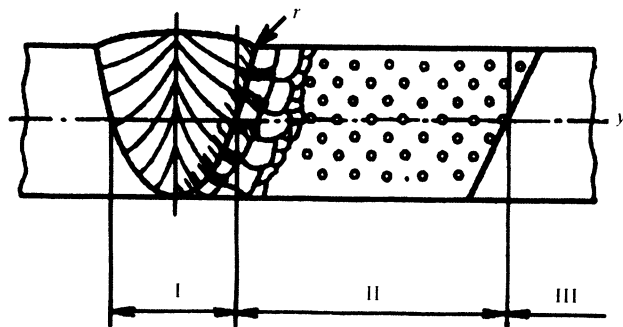


Рис. 4.1. Структурное строение сварного соединения:

I – металл шва; II – ЗТВ; III – основной металла; r – радиус перехода от усиления к основному металлу

1-я степень – структурная неоднородность (крупнокристаллический литой металл шва, набор видоизмененных нагревом структур в ЗТВ и неизменная текстура основного металла).

2-я степень – химическая неоднородность. Она заключается в том, что очень часто для выполнения шва применяют электроды (или присадочные материалы), по своему химическому составу отличающиеся от химического состава основного металла. Кроме этого, перепад концентраций одного и того же элемента в основном металле и шве под влиянием термического цикла сварки может инициировать диффузионные процессы, приводящие иногда к созданию зон с повышенной концентрацией того или иного элемента (например, диффузионной прослойки в районе линии сплавления).

3-я степень – механическая неоднородность. Поскольку зоны сварного соединения имеют различную структуру и химический состав, то в этих зонах наблюдается различие механических свойств. Как правило, во многих случаях химический состав металла шва выбирают так, чтобы прочность металла шва была несколько ниже прочности основного металла. А для получения равнопрочного сварного соединения недостаток прочности компенсируется увеличением сечения шва за счет усиления. Кроме этого, менее прочный металл шва при действии напряжений растяжения работает как «мягкая прослойка», приводя к получению в металле шва (особенно при щелевой разделке кромок) объемного напряженного состояния и увеличению предела прочности сварного соединения при растяжении, обеспечивая, таким образом, его равнопрочность даже при малой (технологической) высоте усиления шва.

4-я степень – геометрическая неоднородность, заключающаяся в изменении сечения из-за наличия усиления шва, которое может иметь разный радиус перехода r к основному металлу. При большой высоте усиления (низкая прочность металла шва) радиус перехода может быть мал, что при нагрузке соединения вызывает в месте перехода высокую геометрическую концентрацию напряжений. Это, особенно в конструкциях из высокопрочных материалов, требует принятия специальных мер для увеличения радиуса перехода r (наплавки «холостых» валиков – галтелей, специальной механической обработки и др.).

4.1. ЗОНА ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ

Основные изменения при сварке плавлением характерны для металла ЗТВ, где они происходят под влиянием сосредоточенного источника теплоты – сварочной дуги. Сущность этих изменений хорошо согласуется в сопоставлении температур нагрева различных объемов металла ЗТВ с диаграммой состояния сплава (в данном случае Fe-C) основного металла. На рис. 4.2 рассмотрены изменения, происходящие при сварке низкоуглеродистой стали с концентрацией углерода C_1 .

Непосредственно рядом со швом находится участок неполного расплавления основного металла. Участок I (нагретый от температур 1100...1200 °C) называется участком перегрева и характеризуется

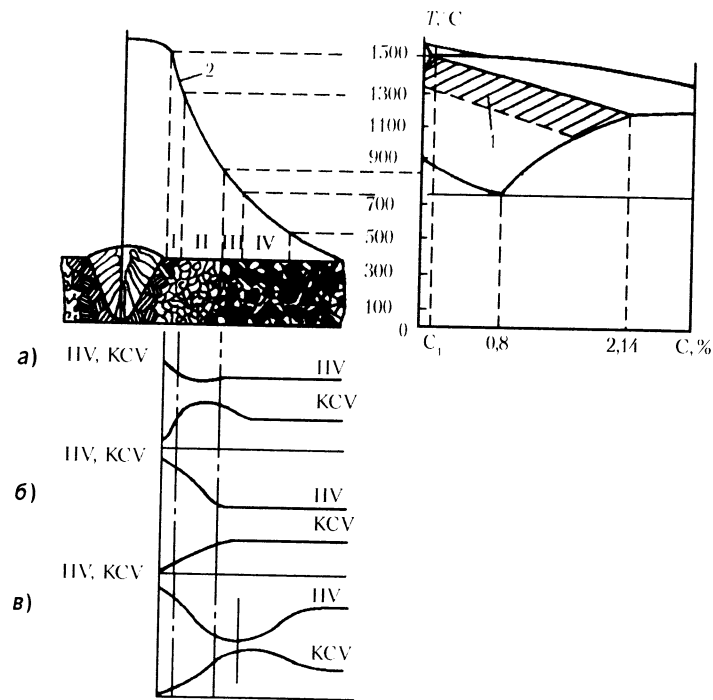


Рис. 4.2. Микроструктура и свойства основного металла в ЗТВ (схема) и характер изменения механических свойств при сварке:

- а – предварительно нормализованной незакаливающейся стали;
 б – закаливающейся стали; в – предварительно закаленной стали;
 1 – область температур перегрева;
 2 – кривая минимальных температур

интенсивным ростом зерна. II участок – перекристаллизации – характерен незначительным нагревом выше точки A_{c3} и имеет мелкозернистую структуру с высокими механическими свойствами. На III участке (между точками полиморфного превращения A_{c3} и A_{c1}) происходит частичная перекристаллизация. Он имеет почти неизменное ферритное зерно с небольшим его измельчением. Металл, нагретый до температур ниже A_c (участок IV), имеет структуру, мало отличающуюся от основного металла. Если до сварки металл подвергался пластической деформации, то после сварки на этом участке происходит рекристаллизация, характеризующаяся сращиванием ранее раздробленных деформаций зерен металла. Большое значение

имеет и предварительная термическая обработка полуфабрикатов (закалка-отпуск, нормализация). Эти операции ведут к изменению механических свойств в ЗТВ (см. рис. 4.2, а–в).

В интервале температур 100...500 °С структура металла не претерпевает сколь-либо значительных изменений, однако, при повышенном содержании в металле кислорода и азота здесь может происходить «старение» металла, сопровождающееся снижением ударной вязкости.

Строение ЗТВ во многом зависит от химического состава стали (сплава), предварительной термической обработки свариваемых деталей, применяемых способов, режимов и технологии сварки.

Так, однопроводная сварка воздействует на металл зоны однократно, многопроводная приводит к автоматической термической обработке металла зоны от предыдущего прохода каждым последующим. При сварке короткими участками околошовная зона (так же, как и шов) длительное время находится в нагретом состоянии. Помимо структурных изменений это приводит к увеличению ширины ЗТВ. Последующие слои термически воздействуют на ранее нагретый металл зоны, производя ее автотермообработку. Такое же тепловое влияние последующие слои оказывают и на литой металл предыдущего шва. В нем тоже возникает ЗТВ, строение и структура которой значительно отличаются от ЗТВ в основном металле, подвергнутому прокатке. Эта зона на участке перегрева не имеет крупного зерна и характеризуется мелкозернистыми структурами с повышенными пластическими свойствами.

Необходимо отметить некоторые особенности свойств участков ЗТВ. К ним относится область сплавления, находящаяся между линиями ликвидус-солидус диаграммы состояния. Для многих сталей этот интервал невелик (30...40 °С), и зона сплавления имеет небольшую ширину, ограниченную размерами 0,08...0,1 мм при ручной дуговой сварке и 0,15...0,2 мм при электрошлаковой и газовой сварке. Изменения химического состава в этой зоне невелики. Кроме некоторого перераспределения серы и водорода, структура крупнозернистая, постепенно переходящая к структуре перегрева. В этом участке довольно часто образуется «видманштетова» структура, характеризующаяся резко выраженной направленностью ферритных выделений. Эта структура приводит к охрупчиванию металла, снижению ударной вязкости до значений 2...3 кгс/см² (0,2...0,3 МДж/м²). Видманштетова структура возникает при большом перегреве металла и более характерна для газовой сварки, чем для дуговой.

Для сталей структурные составляющие, полученные в разных участках ЗТВ, при распаде аустенита определяются скоростями охлаждения металла и его химическим составом. При соответствующем изменении структурных составляющих и размера зерна в разных участках ЗТВ изменяются и ее механические свойства (см. рис. 4.2).

В последнем случае на участке IV наблюдается падение твердости (отпуск). Участок перекристаллизации в случае сварки незакаливающихся сталей характеризуется повышенной ударной вязкостью и пониженной твердостью, что определяется мелкозернистой его структурой.

Ширина ЗТВ зависит от теплофизических свойств основного металла и погонной энергии, определяемой параметрами режима данного способа сварки. Так, при сварке встык листов со сквозным проплавлением общая ширина ЗТВ (см. рис. 4.2) будет равна

$$a = 1,48 \cdot 10^{-4} \frac{q_{II}}{c\gamma s} \text{ [см]},$$

где $q_{II} = \eta_{II} \frac{I_{св} U_{д}}{t_{св}}$ – погонная энергия, Дж/см; $c\gamma$ – объемная теплоемкость, Дж/см³·с; s – свариваемая толщина, см.

Естественно, что с увеличением погонной энергии растут размеры ЗТВ, что ярко выражено в случае ЭШС. Строение и свойства ЗТВ во многом определяют прочностные свойства и эксплуатационную надежность всего сварного соединения.

4.2. МЕТАЛЛ ШВА, ОСОБЕННОСТИ ЕГО КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И СВОЙСТВ

Под кристаллизацией понимают процесс формирования первичной структуры при затвердевании жидкого металла. По мере охлаждения расплавленного металла снижается подвижность его частиц и возрастают силы, которые ниже какой-то критической температуры T_0 стремятся удержать эти частицы в узлах кристаллической решетки, характерной для твердого тела. При этой температуре, равной температуре плавления, равновероятно и твердое, и жидкое состояние данного тела.

В соответствии с существующей теорией кристаллизации для перехода из жидкого состояния в твердое необходимо образование зародышей (центров кристаллизации) твердой фазы и их рост за счет частиц, находящихся в кристаллизующейся жидкости. И для того, и для другого требуется понижение температуры ниже некоей критической (так называемое *переохлаждение*, когда температура на какую-то величину снижается по сравнению с температурой плавления). Если кристаллизуется чистый металл, то его конечная структура характеризуется условиями зарождения и роста кристаллов. В этом случае при кристаллизации даже больших объемов металла его состав по объему может оказаться одинаков.

По-иному протекает кристаллизация сплавов; здесь имеет место неоднородность образования твердой фазы, определяемой процессами ликвации. Ликвация вызывается различной растворимостью легирующих добавок (примесей) в твердой и жидкой фазах сплава. Для равновесной диаграммы состояния двухкомпонентных сплавов с эвтектикой при понижении температуры (до линии ликвидуса) в сплавах с исходной концентрацией примеси C_0 первые кристаллы будут иметь состав в соответствии с точкой 1 (рис. 4.3, а). По мере понижения температуры до линии солидуса (точка 2) незатвердевшая жидкость будет иметь состав точки 3. В точке 4, находящейся между солидусом и ликвидусом, соотношение между твердой и жидкой фазами определяется правилом рычага.

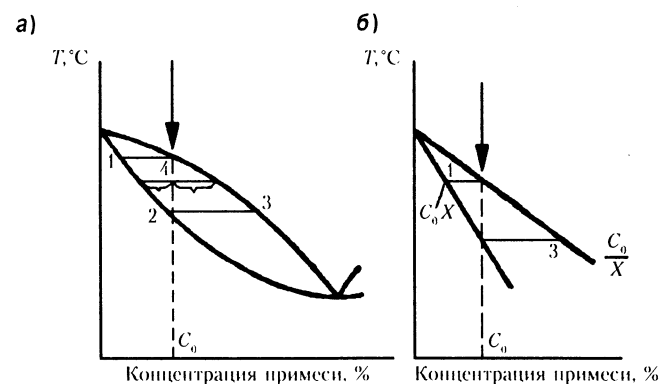


Рис. 4.3. Схема ликвационного перераспределения примеси:

а – для двухкомпонентной системы с эвтектикой;
б – к определению коэффициента ликвации

Связь между составами точек 1 и 3 определяется коэффициентом ликвации χ (рис. 4.3, б). Чем больше этот коэффициент отличается от единицы, тем больше состав первых кристаллитов отличается от затвердевающей в последнюю очередь жидкости. Отсюда ясно, что скорость кристаллизации в значительной мере определяет средний состав затвердевшего металла. При малой скорости кристаллизации избыточная примесь в жидком металле успевает удалиться от фронта кристаллизации, постепенно обогащая объем остающейся фазы. При увеличении скорости кристаллизации, особенно при дендритной форме фронта в жидкой фазе, примесь не успевает удалиться от фронта кристаллизации. В этом случае средний состав затвердевшего металла ближе к исходному составу жидкого – ликвация станет меньше.

Фактические скорости роста кристаллов даже в слитках значительной массы всегда имеют большие значения, и удаление примеси в незакристаллизовавшийся металл происходит не полностью. Если предположить, что скорость кристаллизации мала (стремится к нулю), то застывший металл долго находится при повышенной температуре (здесь скорости диффузии элементов в жидком металле велики), примесь может выровнять свою концентрацию по всему объему, и конечной неоднородности состава наблюдаться не будет. При некотором повышении $\tau_{кр}$ исходная неоднородность еще велика и одновременно сокращается время на выравнивание содержания примеси в застывающем металле, что приведет к увеличению ликвационной неоднородности металла. Наиболее велика ликвационная неоднородность в кипящей стали, где диффузия в процессе затвердевания усиливается «кипением» (перемешиванием стали в процессе кристаллизации).

Известно также, что кроме неравномерности распределения примеси во всем объеме закристаллизовавшегося металла имеется неоднородность распределения примеси в осях и межосевых промежутках дендритов (дендритная неоднородность). Влияние скоростей роста дендритов (скорости охлаждения) на дендритную неоднородность такое же, как и ее влияние на зональную неоднородность.

Теория кристаллизации сварочной ванны возникла на базе общей теории кристаллизации металлов и теории кристаллизации слитков (отливок). Необходимость создания такой самостоятельной теории обусловлена рядом специфических особенностей, присущих процессу сварки. Основными из них являются:

- 1) условия кристаллизации металла сварочной ванны, когда в нее вводится теплота от локализованного движущегося сварочно-го источника тепла (сварочной дуги);

- 2) наличие в ванне жидкого металла, ограниченного количества центров кристаллизации в виде полурасплавившихся зерен основного металла на границе сплавления;
- 3) наличие в ванне значительного градиента температур, большой перегрев металла в центральной части ванны;
- 4) значительное перемешивание металла ванны, вызванное движением его под влиянием давления дуги;
- 5) малый объем ванны и непродолжительность ее существования в расплавленном состоянии, кристаллизация металла при больших скоростях роста кристаллов.

Кроме этого, часто наблюдается исходная химическая неоднородность жидкого металла в различных районах сварочной ванны, вызванная различием в химическом составе основного и наплавленного металла. В соответствии с современными воззрениями процесс кристаллизации металла в условиях сварочного нагрева можно представить следующим образом.

Кристаллизация сварочной ванны происходит по периферии и ввод в нее тепла принципиально меняет закономерности роста кристаллитов от границ сплавления к центру ванны по сравнению с кристаллизацией слитка. Здесь, на границе раздела фаз, наряду с отводом тепла существует и его подвод. Если границу раздела твердого и жидкого металла в сварочной ванне (рис. 4.4, а) развернуть в прямую линию $АВВ$ (рис. 4.4, б), то левее точки $В$ будут расположены участки головной части ванны (там происходит расплавление металла), а правее, до точки $В$ – участки хвостовой части (в ней происходит кристаллизация жидкого металла сварочной ванны). Видно, что на участке $АВ$ подвод тепла из ванны превышает его отвод в твердый металл, а на участке $ВВ$ отвод тепла больше подвода; в точке $В$ тепла отводится столько, сколько подводится.

Кристаллизация металла сварочной ванны начинается на тех участках ее межфазной поверхности, где отвод тепла в основной металл и окружающую среду начинает превышать его подвод от сварочного источника теплоты. Рост кристаллов происходит путем образования новых атомных слоев твердой фазы. Первые кристаллиты начинают свой рост у линии сплавления от полурасплавившихся зерен основного металла и имеют ориентацию этих зерен, при этом растущие кристаллиты значительно разориентированы. Рост кристаллитов в ванне идет по эпитаксиальному механизму, т. е. в своем развитии они стремятся продолжить кристаллографическое направление кристаллов подложки (полурасплавившегося зерна основного металла). Число кристаллитов у линии сплавления

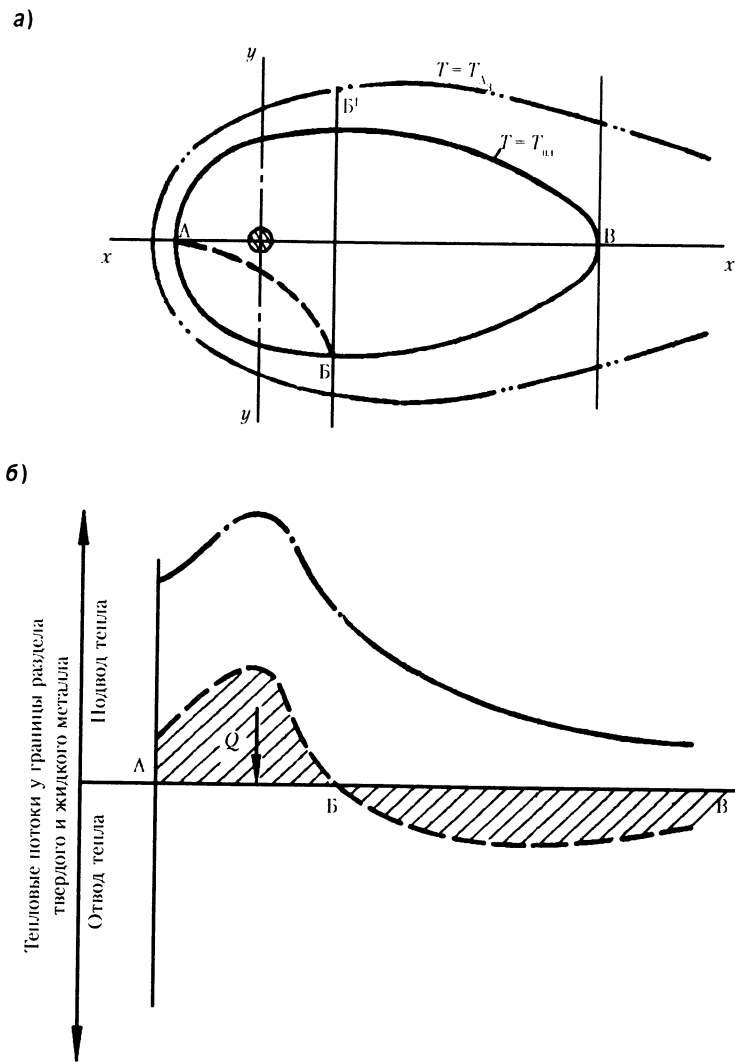


Рис. 4.4. Схема изменения интенсивности тепловых потоков на границе раздела жидкого и твердого металла в сварочной ванне:

a — изотерма квазистационарного поля $T = T_{ш}$;
б — характер изменения подвода и отвода теплоты от границы твердого и жидкого металла

равно числу кристаллов оплавленных рекристаллизованных зерен, а границы, формирующиеся между кристаллитами, являются продолжением границ рекристаллизованных зерен основного металла.

Скорости роста кристаллитов по различным кристаллографическим направлениям различны. К тому же скорость роста конкретного кристаллита определяется термоконцентрационными условиями, сложившимися в окружающем расплаве. По мере роста от линии сплавления к центру ванны кристаллиты сталкиваются и вступают во взаимодействие друг с другом. В этих условиях действует механизм так называемого конкурентного роста кристаллитов — кристаллиты, имеющие наиболее благоприятное расположение по отношению к максимальному температурному и концентрационному градиентам, выклинивают менее благоприятно расположенные кристаллиты.

В каждый данный момент времени кристаллиты стремятся продолжить свой рост. Те из них, у которых кристаллографическое направление максимально близко или совпадает с направлением теплового потока через межфазную поверхность, имеют траектории роста кристаллитов в металле шва в виде пространственных кривых, направление которых в данный момент времени совпадает с направлением нормали к касательной в данной точке поверхности сварочной ванны. Исходя из предположения, что кристаллит должен расти по нормали к межфазной поверхности, и в результате проведенных металлографических исследований М. В. Шаманиным была установлена связь между скоростью кристаллизации и скоростью сварки

$$v_{кр} = v_{св} \cos \alpha_0,$$

где α_0 — угол между нормалью к касательной межфазной поверхности в заданной точке и направлением вектора скорости сварки (рис. 4.5, а).

С учетом конкурентного роста кристаллитов направление их роста в ряде случаев может существенно отличаться от нормали к межфазной поверхности на значение $\Delta \alpha_0$. Такой случай является более общим для условий сварки, и для него рассчитанная по вышеприведенной формуле скорость кристаллизации окажется несколько заниженной. Точнее будет расчет по формуле

$$v_{кр} = \frac{\cos \alpha_0}{\cos \Delta \alpha} v_{св},$$

где $\Delta\alpha$ – угол между осью кристаллита и направлением нормали к межфазной поверхности в данной точке (рис. 4.5, б).

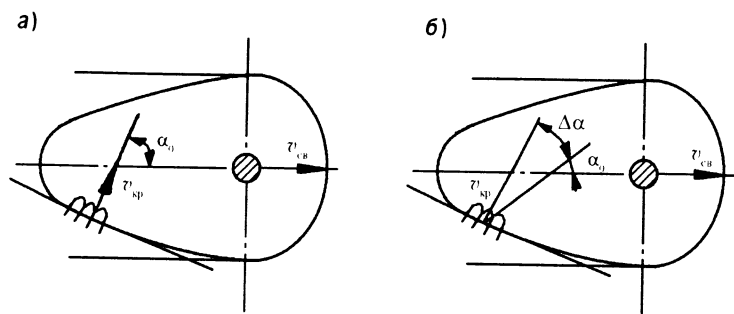


Рис. 4.5. К определению скорости роста кристаллита в сварочной ванне:
а – при бесконкурентном росте; б – при конкурентном росте

Размеры и форма кристаллитов в металле шва в каждом конкретном случае связаны со строением фронта кристаллизации сварочной ванны, который в свою очередь определяется термоконцентрационными процессами у межфазной поверхности (режимом сварки, химсоставом основного и присадочного металла и др.).

В общем случае в сварочной ванне могут наблюдаться следующие формы кристаллизации фронта: гладкая, ячеистая, ячеисто-дендритная и дендритная с равноосными кристаллами перед фронтом кристаллизации. Однако на практике мы имеем дело лишь с частью перечисленных форм фронта. Для того чтобы в объеме жидкой фазы началось образование зародышей твердой фазы, ее фактическая температура T_ϕ должна опуститься ниже равновесной температуры кристаллизации T_1 , т. е. необходимо, чтобы жидкость имела некоторое переохлаждение относительно температуры T_E . Требуемая величина термического переохлаждения $\Delta T = T_E - T_\phi$ определяется такими факторами как количество примесей в расплаве, наличие модификаторов, и увеличивается по мере увеличения чистоты расплава, достигая максимальных значений для сверхчистых металлов. Для последних образование твердой фазы в жидкую происходит по гомогенному механизму; при этом необходимая величина переохлаждения может достигать значений $\Delta T \approx 0,2T_E$.

Технически чистые металлы и различные сплавы кристаллизуются при меньшем значении переохлаждения – от нескольких единиц до нескольких десятков градусов. Это объясняется наличием в расплавах частиц тугоплавких соединений, модификаторов, поверхностно активных

веществ и т. п., которые существенно снижают энергию межфазового перехода. При этом процесс образования новой твердой фазы всегда происходит только по гетерогенному механизму (рост начинается на готовых подкладках как центрах кристаллизации, такими подкладками при сварке являются, главным образом, полурасплавившиеся зерна основного металла, частички модификаторов и т. п.).

В определенных условиях рост твердой фазы происходит в объемах расплава, температура которого может даже несколько превышать равновесную температуру сплава. Рядом исследователей было показано, что при малых скоростях кристаллизации у межфазной поверхности со стороны жидкой фазы концентрация легирующих компонентов существенно повышается вследствие их разной фазовой растворимости. Образуется так называемая зона концентрации уплотнения (рис. 4.6, а). С изменением концентрации примеси в указанных объемах происходит и соответствующее изменение равновесной температуры кристаллизации, что приводит к тому, что в жидкой фазе возникают переохлажденные участки расплава, хотя его фактическая температура T_ϕ в этих участках находится ниже равновесной температуры кристаллизации T_1 на межфазной поверхности; в этом случае растущий фронт неустойчив.

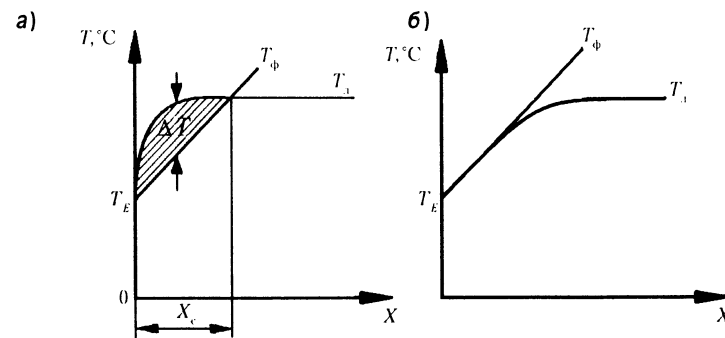


Рис. 4.6. Переохлаждение жидкого металла при кристаллизации:
а – концентрационное; б – термическое

Возникающее переохлаждение именуется концентрационным, в отличие от обычного, термического переохлаждения (рис. 4.6, б). Наиболее заметное влияние концентрационное переохлаждение оказывает на процесс кристаллизации при малых скоростях сварки. Исходя из выводов теории концентрационного переохлаждения можно предсказать качественные изменения фронта кристаллизации при

изменении условий сварки. Было показано, что характер строения межфазной поверхности может быть определен в зависимости от условий кристаллизации (рис. 4.7). По одной оси этой диаграммы откладывается средняя концентрация примеси (содержание легирующего элемента) в бинарном сплаве с концентрацией C_0 , а по другой – некоторый параметр, равный отношению величины температурного градиента у межфазной поверхности в жидкой фазе ΔT к величине скорости роста кристалла $v_{кр}$. С помощью этой диаграммы увязываются воедино как температурные, так и концентрационные условия роста твердой фазы.

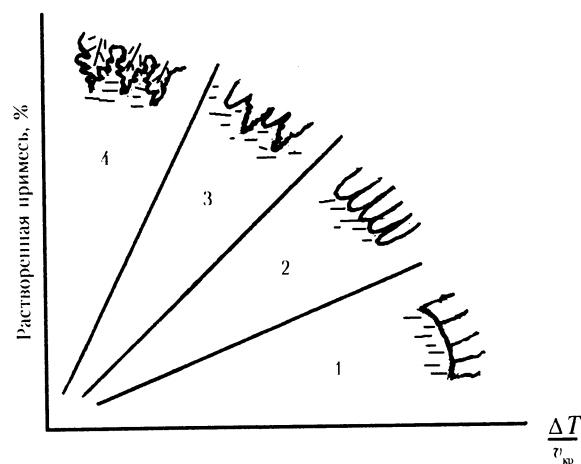


Рис. 4.7. Схематическое изображение характера строения межфазной поверхности в зависимости от условий кристаллизации:

- 1 – гладкая форма (плоский фронт) межфазной поверхности;
 2 – ячеистый фронт; 3 – ячеисто-дендритный фронт кристаллизации;
 4 – дендритный фронт кристаллизации

Представим, что режим сварки остался без изменения, а изменился химический состав расплава ванны (произошло повышение концентрации примеси C_0). И если это изменение C_0 не влечет за собой существенного изменения теплофизических свойств сплава в твердом и жидком состоянии, то при сохранении постоянными режимов сварки сохранится и неизменной величина $\frac{\Delta T}{v_{кр}}$. Это означает, что увеличение C_0 должно привести к повышению разветвленной

межфазной поверхности в сварочной ванне (см. рис. 4.7). К аналогичным последствиям должно приводить и повышение скорости сварки (если прочие параметры режима сварки и величина C_0 остаются постоянными). Увеличение скорости сварки влечет за собой повышение скорости роста кристаллов $v_{кр}$ и уменьшение значения параметра $\frac{\Delta T}{v_{кр}}$.

Характер первичной кристаллизации шва оказывает существенное влияние на формирование его макро- и микроструктуры, а для сплавов с полиморфным превращением – и на процесс вторичной кристаллизации. Структурное состояние металла шва, размеры кристаллитов и особенности их строения, в свою очередь, для большинства металлов и сплавов определяют их пластические свойства и технологическую прочность. Так, выраженным направленным ростом кристаллитов и наличием достаточно толстых прослоек выделения вторичных фаз и эвтектик по их границам обуславливается уменьшение такой структурно-чувствительной характеристики как ударная вязкость металла шва. Поэтому разработан ряд способов, обеспечивающих измельчение и дезориентацию кристаллитов в процессе кристаллизации сварочной ванны, приводящих в результате к повышению механических и технологических свойств металла шва. Эти способы могут быть разбиты на два направления: металлургические и внешнего физического воздействия.

Металлургический путь воздействия регулирует первичную структуру с помощью модификаторов 1-го рода. Процесс этот заключается во введении в жидкий кристаллизующийся металл тугоплавких примесей со структурой, изоморфной кристаллизующемуся сплаву, – они-то и являются принудительными центрами кристаллизации. Это достаточно легко удается при сварке относительно легкоплавких металлов (например, алюминиевых сплавов, где в качестве модификаторов используются Ti или Zr). При сварке стали появляются затруднения, так как значительный перегрев и перемешивание металла в сварочной ванне способствуют дезактивации даже тугоплавких модификаторов. Модифицирующие добавки обычно вводят через электродную (или присадочную) проволоку (иногда через флюс). Возможно также применение модификаторов 2-го рода, представляющих собой поверхностно-активные примеси, которые обволакивают растущие кристаллы, чем создают благоприятные условия для зарождения и роста новых центров кристаллизации.

Внешние физические влияния заключаются либо в воздействии на кристаллизующийся металл вибрации, ультразвуковых колебаний,

либо в перемешивании его с помощью внешних электромагнитных полей. Взглядов на механизм воздействия этих факторов несколько. По одному из них, в жидком металле перед фронтом кристаллизации создаются силы, способные «отщеплять» ветви растущих дендритов (учитывая их малую прочность). При этом образуются в определенном температурном интервале жидкого металла перед фронтом кристаллизации искусственно созданные центры кристаллизации, что и способствует дезориентации и измельчению структуры первичной кристаллизации.

Введение упругих колебаний в кристаллизующийся металл может производиться на низких (вибрация изделия) и ультразвуковых частотах. В последнем случае ультразвуковые колебания вводятся непосредственно в жидкий металл кристаллизующейся хвостовой части сварочной ванны с помощью волновода, одним своим торцом закрепленным на магнито-стрикционном вибраторе. Это способ контактного ввода; он применим лишь при автоматической (или электрошлаковой) сварке и требует создания специализированных приспособлений на автомате. Кроме того, введение наконечника волновода в жидкий металл ведет к его достаточно быстрому эрозионному износу – это является недостатком способа. Проще вводить ультразвук в сварочную ванну при ЭШС. Создаваемые при этом в жидком металле упругие колебания приводят к измельчению концов растущих кристаллитов и значительному измельчению макроструктуры: на рис. 4.8 приведена макроструктура закристаллизовавшегося металла алюминиево-магниевого сплава с введением ультразвуковых колебаний и без него. Для получения эффекта необходимо, чтобы силы трения, возникающие у фронта растущих кристаллов, были сопоставимы с прочностью металла растущих кристаллитов.

а)



б)



Рис. 4.8. Макроструктура металла шва алюминиевого сплава ($\times 5$):

а – без введения ультразвука; б – с введением ультразвука частотой 20 кГц

Метод электромагнитного перемешивания заключается в перемешивании металла кристаллизующейся ванны под влиянием взаимодействия электрического поля дуги с электромагнитным продоль-

ным полем импульсного воздействия, создаваемых соленоидом, расположенным в зоне плавления электродной проволоки. Меняя амплитуду и частоту следования разнополярных импульсов внешнего поля, можно менять картину гидродинамического перемешивания металла, уменьшая его пористость и регулируя структуру. Метод более практичен, так как внешнее воздействие происходит без физического контакта инструмента (соленоида) с жидким металлом ванны.

4.3. ПОНЯТИЕ «СВАРИВАЕМОСТИ» МЕТАЛЛОВ

Под технологической свариваемостью данного металла или сплава понимается совокупность свойств основного металла, определяющих чувствительность к термическому циклу сварки и способность при выбранной технологии сварки образовывать сварное соединение со свойствами, которые удовлетворяют требованиям надежной эксплуатации сварной конструкции.

Технологическая свариваемость зависит также от химического состава наплавляемого (электродного) металла, способа сварки и выбранных режимов, применяемых флюсов, покрытий, защитных газов, конструкции сварного узла и условий эксплуатации сварной конструкции. Под хорошей свариваемостью данного сплава или стали понимают возможность получения равнопрочных сварных соединений без трещин и снижения пластичности в металле шва и околошовной зоны при обычной технологии сварки без применения специальных приемов (например, подогрева перед сваркой).

В зависимости от условий эксплуатации конструкции к свариваемости могут предъявляться дополнительные требования (высокая коррозионная стойкость, температура перехода металла зон сварного соединения в хрупкое состояние и т. д.). Естественно, что с усложнением условий эксплуатации конструкций увеличивается число требований, определяющих хорошую свариваемость. Иными словами, при оценке свариваемости должна учитываться тесная взаимосвязь между свойствами материала, спецификой изготавливаемой конструкции и технологией сварки. Эта совокупность значительно усложняет методику определения свариваемости и делает однозначно невозможной разработку единой методики, учитывая комплексное понятие свариваемости. Поэтому для оценки свариваемости проводят ряд испытаний, каждое из которых выявляет то или иное свойство. По направленности испытаний их можно разбить на три группы.

1. Определение стойкости металла различных зон сварного соединения против образования горячих трещин. Здесь применяется целый ряд проб, позволяющих производить как качественную, так и количественную оценку. Как правило, пробы для качественной оценки имеют различную жесткость, и оценка производится визуальным осмотром контрольного шва или его излома.

Пробы для количественной оценки представляют собой специальные образцы с поперечным или продольным швом, которые растягиваются в процессе сварки приложением внешней силы. Критерием оценки является величина скорости деформации образца, вызывающая образование трещин в сварном валике, наплавленном на образец во время его нагружения.

2. Оценка стойкости металла ЗТВ и шва против образования холодных трещин. Здесь испытание также производится путем сварки проб различной жесткости при различных скоростях охлаждения металла ЗТВ. Далее производится контроль различными способами на предмет обнаружения трещин. Считается, что совокупность материалов, конструктивного оформления сварного соединения и технологии, обеспечивающие отсутствие трещин на пробе, гарантирует их отсутствие и при сварке конструкции.

3. Определение стойкости металла против перехода в хрупкое состояние. Один и тот же металл может разрушаться по-разному – вязко или хрупко. И если первый вид разрушения нормален, так как он наступает после определенного повышения нагрузки и ему предшествует пластическая деформация, то второй вид характеризуется весьма высокой скоростью распространения трещин практически без нарастания нагрузки. Это говорит о том, что существуют факторы, способствующие переходу металла из одного состояния в другое. К ним относятся температура, скорость нарастания деформации и концентрация напряжений. Проведенные на разных материалах исследования показывают, что сопротивление отрыву мало зависит от изменения температуры и скорости изменения деформации, а сопротивление сдвигу эту зависимость явно демонстрирует. При этом переход металла в хрупкое состояние наступает при определенной температуре (это и есть температура перехода металла в хрупкое состояние). Было показано, что одни и те же материалы в зависимости от температуры и

скорости нагружения могут находиться либо в пластическом, либо в хрупком состоянии. Любой надрез на металле повышает предел текучести у корня надреза, увеличивает концентрацию напряжений в его вершине и повышает температуру перехода металла в хрупкое состояние, что может способствовать разрушению конструкции при ее работе и при положительных температурах.

Существует ряд методик определения стойкости против перехода металла в хрупкое состояние, которые можно условно разделить на две группы:

- 1) определение температуры перехода металла в хрупкое состояние (порога хладноломкости) путем испытания серии надрезанных образцов (при различной остроте надреза) на ударный изгиб при различных температурах;
- 2) определение порога хладноломкости специальных образцов, в той или иной степени имитирующих условия эксплуатации конструкции.

Существуют также комплексные методы испытаний стали на ее чувствительность к термическому циклу сварки, которые своей целью имеют выбор таких режимов сварки, которые обеспечивают получение в ЗТВ металла, по своим свойствам отвечающего предъявляемым требованиям (например, проба ИМЕТ или валиковая проба). Часто применяются пробы, определяющие служебные характеристики металла шва, ЗТВ и сварного соединения в целом. На них определяются прочность, пластичность, коррозионная стойкость этих зон либо иные свойства в зависимости от условий эксплуатации данной конструкции.

4.4. ГОРЯЧИЕ ТРЕЩИНЫ ПРИ СВАРКЕ

Этот тип дефектов часто встречается при сварке и объясняется в общем случае тем, что возникающие при охлаждении кристаллизующегося металла деформации укорочения не обеспечиваются его деформационной способностью. Горячие трещины в зависимости от температуры их образования делятся на кристаллизационные и подсолидусные. На рис. 4.9 схематично объяснен механизм образования кристаллизационных трещин. Кривая 3 отражает изменение пластичности металла в области высоких температур (так называемый температурный интервал хрупкости – ТИХ), а отрезки 1 и 2 – нарастание деформаций от момента

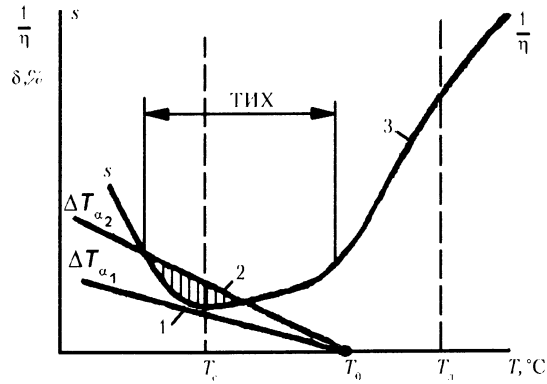


Рис. 4.9. Пластичность металла в двухфазной области и тепловые деформации при снижении температуры:

T_0 – температура начала усадки; T_c и T_l – температуры линий солидуса и ликвидуса диаграммы состояния; 1 – минимальная тепловая деформация ΔT_{α_1} ; 2 – максимальная тепловая деформация ΔT_{α_2} ; 3 – изменение пластичности металла при нагреве

образования сплошного кристаллического скелета (при температуре T_0). Наклон прямых 1 и 2 различен. Если $\alpha_2 > \alpha_1$, то наклон прямой 2 больше, чем прямой 1. При этом фактическая деформация меньше деформационной способности металла во всем диапазоне температур, и прямая 1 расположена ниже кривой 3. Иначе – фактическая деформация меньше деформационной способности металла в ТИХ, и горячих трещин ожидать не следует. Если же вблизи от температуры ликвидуса деформации при охлаждении выше деформационной способности металла (прямая 2 пересекает кривую 3), то могут появиться горячие трещины.

Поэтому важным для предотвращения горячих трещин является выбор такого металла шва, который обладал бы в температурном интервале хрупкости высокой деформационной способностью. Наличие различных элементов-примесей в металле шва приводит при кристаллизации к образованию легкоплавких эвтектик, располагающихся по границам кристаллитов, где легко и происходит разрушение при деформациях. В ряде случаев образовавшиеся горячие трещины могут «залечиваться», если в кристаллизующемся металле имеется достаточное количество эвтектик, температура плавления которых ниже температуры плавления основного металла, находящегося в данный момент времени в закристаллизовавшемся состо-

янии (эвтектики находятся в жидком состоянии по границам растущих кристаллитов). Если количество жидкой эвтектики велико, то образовавшаяся трещина заливается еще жидкой эвтектикой.

Большое влияние на образование горячих трещин оказывает характер первичной структуры кристаллизации. При крупнокристаллической структуре и определенной толщине эвтектических прослоек по границам зерна склонность к образованию горячих трещин растет, а при измельчении зерна – уменьшается. Поэтому полезны любые способы измельчения зерна (модификация, электромагнитное перемешивание и др.) или изменение фазового состава металла шва. Так, однофазные аустенитные стали и никелевые сплавы имеют повышенную склонность к образованию горячих трещин – добавление элементов, образующих ферритную фазу, эту склонность уменьшает.

Из технологических приемов следует отметить выбор режимов сварки, обеспечивающих благоприятную форму шва (отношение ширины шва к глубине провара: $\frac{B}{N} = \psi$). Более широкие швы менее склонны к образованию горячих трещин, что связано с характером кристаллизации (рис. 4.10).

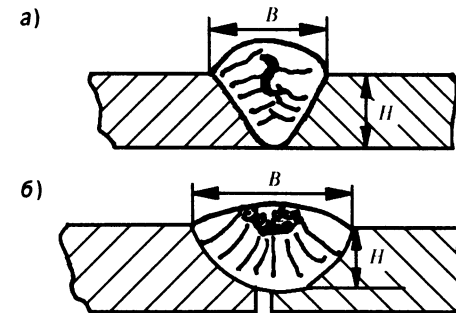


Рис. 4.10. Влияние коэффициента формы проплавления на образование горячих трещин в металле шва:

$$a - \psi \left(\frac{B}{H} \right) \leq 1,5 \text{ (большая склонность); } b - \psi \left(\frac{B}{H} \right) = 1,5 - 3 \text{ (меньшая склонность)}$$

При сварке перлитных сталей (низко- и среднелегированных) уменьшение образования горячих трещин наблюдается при введении подогрева, а при сварке аустенитных сталей – с применением жестких режимов.

4.5. ХОЛОДНЫЕ ТРЕЩИНЫ ПРИ СВАРКЕ

Холодные трещины при сварке определяются как межкристаллическое разрушения металла, могущее происходить как в металле шва, так и в металле ЗТВ. Причинами образования такого рода трещин являются:

- 1) структурное состояние металла шва и ЗТВ (наличие составляющих мартенситного и бейнитного типа);
- 2) наличие достаточно высокого уровня растягивающих напряжений 1-го рода, определяемого конструктивными особенностями элементов сварной конструкции (ее жесткостью), типом металла шва, параметрами режима сварки;
- 3) повышенное содержание водорода в металле шва.

Холодные трещины являются одним из случаев замедленного разрушения металла, которое связано с микропластическим течением по границам зерна. Очаги трещин, возникающих в относительно малопластичном металле с большим содержанием низкоуглеродистого мартенсита, имеют, как правило, микроскопические размеры. Распространение таких микротрещин связано с развитием у ее вершины пластической деформации, контролируемой энергией пластического течения.

Водород образует пересыщенный твердый раствор в зоне растягивающих трехосных напряжений у острия микротрещины, что снижает критический размер микротрещины и уменьшает сопротивление ее дальнейшему развитию.

Оценка сопротивляемости сталей образованию холодных трещин производится разными способами:

- а) по химическому составу расчетом углеродного эквивалента и сопоставлением полученных по эмпирической формуле значений с критическим;
- б) то же, но с учетом жесткости соединения;
- в) путем сварки лабораторных технологических проб различной жесткости.

Предотвращения образования холодных трещин (или увеличения сопротивляемости сталей их образованию) можно добиваться следующими средствами.

1. Выбором таких режимов теплового воздействия на металл, при которых в шве и ЗТВ будут наблюдаться благоприятные структуры (перлитная, структура нижнего бейнита или определенное граничное содержание мартенсита). Эта мера связана с технологическими приемами, регулирующимися изменением величины погонной энергии q_{II} , применением предварительно-

го или сопутствующего подогрева с последующим отпуском (или без него).

2. Снижением уровня остаточных сварочных напряжений (в том числе и реактивных) путем создания рациональных конструкций сварных узлов и различными технологическими способами (в том числе проковкой либо прокаткой металла шва).
3. Снижением содержания водорода в металле шва до значений, устанавливаемых нормативной документацией для конкретного химического состава металла шва. Это достигается прокалкой электродов и флюса, уменьшением скоростей охлаждения сварного соединения при подогреве и последующем отпуске.

Одним из методов оценки склонности к образованию холодных трещин при сварке сталей может служить расчетное определение углеродного эквивалента. Расчет ведется, исходя из влияния каждого легирующего элемента данной системы легирования по отношению к главному упрочняющему элементу системы – углероду.

Предложен целый ряд формул для определения углеродного эквивалента. К числу наиболее употребляемых относится

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Ni}}{10} + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Cu}}{5} + \frac{\text{Mo}}{4} + \frac{\text{V}}{14}.$$

Получив для данного состава стали значение $C_{\text{экв}}$, определяют склонность ее к появлению холодных трещин при сварке.

Стали с $C_{\text{экв}} < 0,45$ не склонны к образованию холодных трещин. В сталях с $C_{\text{экв}} > 0,45$ при сварке они потенциально возможны. Иными словами, углеродный эквивалент характеризует прокаливаемость стали, т. е. некоторую критическую скорость закалки на заданную твердость. Для сварных соединений, выполненных на сталях различного состава, за допустимую твердость принимают величины до HV 350; при такой твердости на практике не наблюдается холодных трещин (считается, что стали с углеродным эквивалентом $C_{\text{экв}} < 0,45$ во всем возможном диапазоне скоростей охлаждения не закаляются до твердости выше HV 350). Однако для сталей с углеродным эквивалентом $C_{\text{экв}} > 0,45$ его нельзя считать единственным показателем, определяющим склонность этих сталей к образованию холодных трещин при сварке.

Учитывая изложенные причины, влияющие на образование холодных трещин, японские исследователи приводят следующий параметр трещинообразования:

$$P_{\alpha} = C + \frac{\text{Si}}{20} + \frac{\text{Mn}}{20} + \frac{\text{Cr}}{20} + \frac{\text{Cu}}{20} + \frac{\text{Mo}}{15} + \frac{\text{V}}{10} + 5\text{B} + \frac{[\text{H}]}{60} + \frac{k_0 s}{40 \cdot 10^3},$$

где $[\text{H}]$ – содержание диффузионного водорода в металле шва, $\text{см}^3/100 \text{ г}$;

k_0 – коэффициент жесткости соединения, $\frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2 \cdot \text{мм}}$; s – толщина металла, мм.

Коэффициент k_0 характеризуется силой сопротивления, соответствующей перемещению кромок соединения на 1 мм и отнесенной к толщине металла и длине шва. Для различных по жесткости сварных соединений $k_0 = 50 \dots 400 \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2 \cdot \text{мм}}$.

В уравнение введено и содержание водорода как фактора, способствующего образованию холодных трещин; диффузионный водород в металле шва определяется по принятым методикам.

Если критерий трещинообразования $P_{\alpha} > 0,285$, то в сварных соединениях с V-, X- и U-образными разделками появляется вероятность образования холодных трещин. Такие расчеты и экспериментальные исследования по определению чувствительности различных зон сварного соединения к образованию холодных трещин проводятся на стадии определения свариваемости основного материала, выбора сварочных материалов, способов сварки, параметров режимов сварки. В судостроении проводятся оценочные испытания принимаемых материалов и технологий перед строительством корпусов судов. В частности, этому служит жесткая проба ЦНИИ ТС. Она представляет собой две пластины $0,5 \cdot 2,0 \text{ м}$, собранные для сварки стыкового соединения по наибольшей длине с соответствующей разделкой кромок по принимаемому способу сварки. Пластины перпендикулярно шву закреплены несколькими ребрами жесткости, приваренными до выполнения контрольного шва. Они запрещают угловую деформацию пластин во время сварки контрольного шва. После его сварки соединение контролируется ультразвуком и γ -контролем на предмет выявления дефектов, разрезается по специальной схеме на макрошлифы. После анализа результатов контроля и осмотра шлифов дается заключение о возможности допуска представленных материалов и технологий для промышленного производства.

5. ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

5.1. ФОРМИРОВАНИЕ МЕТАЛЛА ШВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВНЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ

Химический состав металла шва часто отличается от состава основного металла. Это необходимо, чтобы обеспечить равнопрочность литого металла шва с прокатным основным металлом и получить сварной шов нужного качества без трещин и пор.

Любой способ сварки плавлением дает возможность получить шов, представляющий сплав наплавленного (электродного) металла и расплавленного основного металла. Исключением из этого правила является шов, выполненный неплавящимся электродом без присадки – здесь в шве присутствует лишь расплавленный основной металл.

Содержание любого химического элемента в сварном однопроходном шве можно определить, пользуясь правилом смешения, по формуле

$$X_{\text{ш}} = X_o \gamma_o + X_{\text{н}} \gamma_{\text{н}} \pm \Delta X,$$

где $X_{\text{ш}}$, X_o , $X_{\text{н}}$ – концентрации данного элемента соответственно в шве, основном и наплавленном металле; γ_o и $\gamma_{\text{н}}$ – доли участия в металле шва основного и наплавленного металла; ΔX – поправка на изменение концентрации элемента, вызванная химическими реакциями между данным элементом и окружающими газами и шлаками.

Величины γ_o и $\gamma_{\text{н}}$ определяются экспериментальным путем измерения площадей на поперечном макрошлифе (рис. 5.1) и вычисляются с помощью формул

$$\gamma_o = \frac{F_o}{F_o + F_{\text{н}}}; \quad \gamma_{\text{н}} = \frac{F_{\text{н}}}{F_o + F_{\text{н}}}.$$

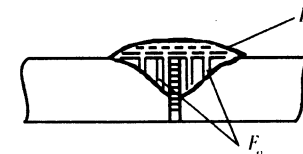


Рис. 5.1. Доля участия наплавленного $F_{\text{н}}$ и основного F_o (расплавленного) металла в металле шва

Отсюда ясны способы регулирования химического состава металла шва, которые осуществляются путем подбора состава наплавляемого металла (выбор электродов, проволоки и флюса, проволоки и защитного газа), а также изменения долей γ_0 и γ_1 путем выбора соответствующей разделки кромок и параметров режима сварки. Еще на заре развития сварки плавлением было обнаружено, что при сварке без защиты (голой электродной проволокой) качество металла шва резко ухудшается; виной тому является кислород и азот, которые активно растворяются в жидком металле сварочной ванны (табл. 5.1)

Таблица 5.1

Химический состав проволоки и наплавленного металла (сталь)

Объект измерения	Химический состав, %				
	C	Si	Mn	O	N
Сварочная проволока	0,08	0,03	0,4	0,02	0,007
Наплавленный металл	0,04	0,02	0,15	0,28	0,15

Из данных таблицы хорошо видно выгорание таких элементов как C, Si и Mn и значительное увеличение содержания в шве N и O. Последнее приводит к изменению свойств металла шва (рис. 5.2).

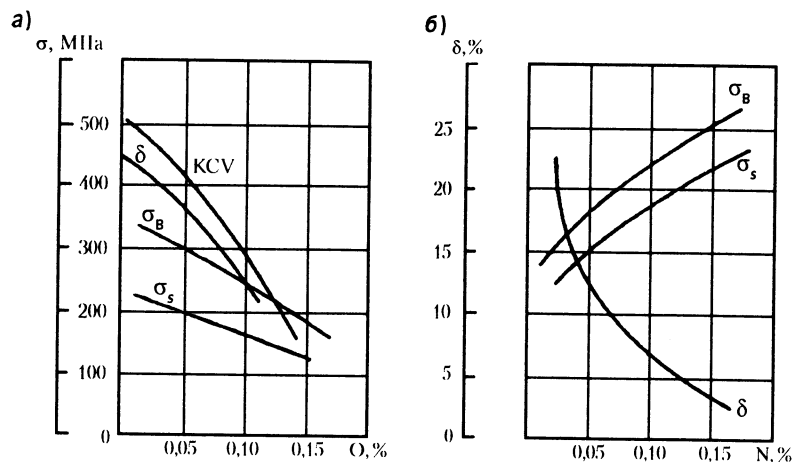


Рис. 5.2. Влияние содержания кислорода (а) и азота (б) на основные механические свойства низкоуглеродистой стали

При остывании металла, пересыщенного кислородом, на границах зерен выделяется закись железа FeO. Это приводит к снижению временного сопротивления разрыву σ_b и предела текучести σ_s с одновременным уменьшением пластических характеристик металла шва. Азот при охлаждении выделяется из твердого раствора в виде игол нитридов железа Fe₄N, располагающихся по объему зерна в плоскостях его скольжения, что приводит к охрупчиванию металла. Совместное действие кислорода и азота значительно увеличивает прочность металла шва и резко уменьшает его пластичность. Так, наплавленный голый низкоуглеродистой проволокой металл показывает следующие свойства:

$$\sigma_b = 340-400 \text{ МПа}; \delta = 5-10\%; KCV = 0,05-0,25 \text{ МДж/м}^2.$$

Поэтому уже первооткрыватели сварки обращали большое внимание на предотвращение отрицательного влияния кислорода и азота на металл шва.

Механизм ликвидации вредного воздействия этих газов заключается в изоляции плавильного реакционного пространства при сварке плавлением (ванны жидкого металла и дуги) от воздушной атмосферы, которая может осуществляться путем шлаковой или газовой защиты (при способах дуговой сварки и ЭШС) либо созданием вакуума (при ЭЛС).

В современных способах сварки используется шлаковая защита (при автоматической сварке под флюсом), комбинированная газошлаковая защита (при ручной сварке покрытыми электродами) либо газовая защита (при сварке плавящимися и неплавящимися электродами в инертных газах и плавящимся электродом в среде активных газов или их смесей). С отрицательным действием кислорода можно бороться применением специальной легированной проволоки.

Электродные покрытия представляют собой смесь газообразующих и шлакообразующих компонентов, которые в процессе сварки предохраняют металл от воздействия воздуха и производят желаемую металлургическую обработку металла (для чего в покрытие могут быть введены различные металлические добавки). Вводимые в покрытие газообразующие (они служат для оттеснения воздуха) и шлакообразующие (они частично изолируют поверхность расплавленного металла) при сварке, как правило, не нейтральны к расплавленному металлу. В качестве газообразующих в покрытия вводят органические добавки (крахмал, декстрин, целлюлозу) или углекислые соли – карбонаты (мрамор, магнезит). Первые при разложении образуют водород, газы CO, CO₂, пары воды при наличии некоторого количества кислорода. Вторые дают CO и CO₂, кислород, некоторое количество

паров воды (в зависимости от технологии изготовления покрытия). Шлакообразующие вещества представляют собой системы окислов различных элементов и галоидных соединений (чаще всего фторидов). Некоторые из них при сварке взаимодействуют с металлом, в частности, окисляя его. Флюсы – шлаки (автоматическая под флюсом и электрошлаковая сварка) по составу, как правило, проще электродных покрытий, но и они содержат окислы (а иногда и газообразующие добавки), а также то или другое количество влаги. Для газовой защиты сварочного пространства применяют либо активные, реагирующие с металлом при сварке, либо инертные, с ним не реагирующие, газы. Наиболее часто применяемый активный газ – углекислота (CO_2). В сварочных условиях он может взаимодействовать с металлом в виде CO_2 , CO , а также углерода и кислорода; если в нем есть примеси воды, то в реакционном пространстве появляются пары воды и водород. В применяемых инертных газах часто имеются примеси (пусть даже в небольших количествах) кислорода, азота, паров воды, которые могут приносить вред металлу шва, особенно при сварке химически активных металлов.

Из изложенного становится ясно, что практически при всех способах сварки плавлением (кроме сварки в глубоком вакууме) необходимо учитывать взаимодействие металла, его примесей или легирующих добавок с окружающей газовой, шлаковой или газошлаковой средой. При этом основными газами являются O_2 , N_2 , H_2 , CO_2 , CO , шлаки же представляют собой системы окислов и галоидов. Известно, что протекание реакций взаимодействия как между простыми веществами, так и сложными соединениями определяется внешними факторами, в частности, такими как температура, давление, скорость поступления вещества в реакционную зону, время взаимодействия и др. Все эти параметры присутствуют при нахождении в сварочной ванне жидкого металла в процессе кристаллизации шва.

Химический состав металла шва, от которого во многом зависят его свойства и дефекты, формируется в результате физико-химической обработки электродного металла и металла сварочной ванны. Весь комплекс этих процессов, протекающих при сварке между жидким металлом и шлаком (газом) и в объеме этих фаз, принято называть сварочным металлургическим процессом.

Большое значение имеют температурные условия в дуге. При плавлении электрода с некоторыми интервалами времени (0,1...0,5 с) капли, образовавшиеся на его торце, отделяются от электрода и переносятся в сварочную ванну. Перенос может осуществляться в мо-

мент короткого замыкания дугового промежутка каплей расплавленного металла, а при большой плотности тока капли отрываются от электрода и пересекают дуговой промежуток. В процессе переноса (его продолжительность составляет 0,01...0,05 с) капли продолжают нагреваться в столбе дуги до температуры 4500...8000 °С, причем их средняя температура может повышаться. В соответствии с различными данными калориметрического измерения температура капель в дуговом промежутке при ручной сварке стальными электродами составляет 2100...2150 °С, повышаясь по мере увеличения силы и плотности тока в электроде. Средняя температура сварочной ванны определяется ~1800 °С, причем с уменьшением объема ванны (например, при ручной сварке, когда ванна меньше, а доля перегретого электродного металла больше) температура ванны достигает 2000 °С. Максимальное время пребывания металла в сварочной ванне в жидком состоянии для различных случаев составляет от нескольких до 30...40 с.

Внешнее давление, при котором происходят реакции во время сварки, обычно равно атмосферному (исключая случаи сварки под водой на значительной глубине и сварку в вакууме). Частое применение для сварки газовых смесей приводит к необходимости учета парциальных давлений (отдельных газов) в смеси.

Капельное плавление добавочного металла усиливает его взаимодействие с окружающей средой, а наличие внутри капель и сварочной ванны шлаковых и газовых частиц еще более увеличивает поверхность взаимодействия шлак–металл и газ–металл. Учитывая высокую температуру, скорости прохождения реакций в этом случае могут быть весьма велики, а транспортировка реагентов не должна совершаться на большие расстояния. Это приводит к необходимости учета кинетики процесса.

Процесс сварки характеризуется изменяющейся во времени температурой и поступлением в реакционную зону порций еще не прореагировавших веществ, поэтому термодинамического равновесия в сварочных условиях достичь нельзя. Однако термодинамические расчеты в металлургии сварочных процессов применяются с учетом следующих обстоятельств:

- 1) в любом участке общей реакционной зоны реакции стремятся к состоянию равновесия, что позволяет по термодинамическим данным определить наиболее вероятное направление протекания реакции в этом объеме;
- 2) вследствие большой скорости протекания реакций на отдельных стадиях процесса можно предполагать достижения в отдельных

объемах состояний, близких к равновесным, и применительно к определенным условиям приближенно рассчитать состав металла, газов и получить представление о влиянии различных параметров процесса на изучаемое явление.

При любом процессе сварки, в котором участвует сварочная дуга, существует парогазовая область (в ее объеме горит дуга), расплавленный металл и шлак (плавильное или сварочное пространство). Все металлургические процессы в плавильном пространстве происходят на двух стадиях – капли и ванны (рис. 5.3).

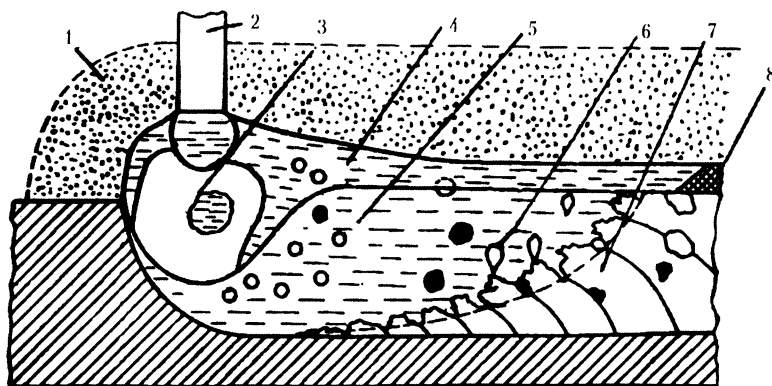


Рис. 5.3. Продольный разрез сварочной ванны при сварке под флюсом:

- 1 – слой флюса; 2 – электродная проволока; 3 – парогазовый пузырь;
- 4 – жидкий шлак; 5 – сварочная ванна; 6 – выделяющиеся газы;
- 7 – закристаллизовавшийся металл шва; 8 – застывший шлак

На первой стадии плавящийся металл перегрет, и наблюдаются максимальные изменения в его химическом составе, вызванные его легированием и испарением из шлака покрытия или флюса, а также растворением газов в металле.

На стадии ванны металл перегрет значительно меньше, и развитие получают процессы рафинирования (очистки) металла шва, от которых зависит и его конечный химический состав, и образование в нем дефектов типа неметаллических включений, трещин и пор.

В зоне дуги существуют две основные фазы – газовая и шлаковая. Газовая состоит из газообразных продуктов разложения компонентов покрытий (флюса), защитных газов и паров металлов. Степень химического воздействия газовой фазы на металл зависит

от содержания в ней кислорода, азота, водорода, углекислого газа и окиси углерода.

Поскольку сварка никогда не производится голым электродом в воздушной среде, то источником кислорода в газовых смесях служит углекислый газ, который либо вводится в сварочное пространство в виде защитного, либо образуется при диссоциации содержащихся в покрытии карбонатов с последующим разложением по реакции $2\text{CO}_2 = 2\text{CO} + \text{O}_2$.

Источником азота является воздух, поглощенный при сварке. Азот практически полностью остается в металле, и его конечное содержание хорошо характеризует качество защиты от воздуха. Допустимым при разных способах сварки считается содержание азота в металле шва в пределах 0,002...0,025%.

Водород попадает в металл при диссоциации молекул воды, содержащейся в покрытиях, флюсах, газах, а также в виде химически связанной воды в гидроокисях на поверхности проволок или свариваемых кромок (ржавчина). Источником водорода могут быть и органические соединения, содержащиеся в покрытиях некоторых марок электродов. Попадаемое в реакционное пространство количество влаги зависит от относительной влажности и температуры воздуха.

Шлаковая фаза, как уже было сказано, представляет собой сплав окислов металлов и солей. Сварочные шлаки состоят из основных окислов (MgO , MnO , FeO , K_2O , Na_2O), кислых (SiO_2 , TiO_2 , Zr_2O_2) и амфотерных (Al_2O_3 , V_2O_5 , Fe_2O_3). В качестве солей при сварке сталей и медных сплавов широкое применение находит плавиковый шпат (фторид кальция CaF_2), во флюсах для сварки таких химически активных металлов как алюминий и титан – фториды и хлориды калия, натрия, лития, бария.

Химическая активность шлака определяется только содержанием в нем свободных (активных) окислов. Она зависит от соотношения количества основных и кислотных окислов и приближенно оценивается коэффициентом основности

$$B = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2}$$

Шлаки называют основными, если $B > 1$, и кислыми, если $B < 1$. При $B = 1$ шлак нейтрален.

Все металлургические процессы, происходящие в плавильном пространстве, можно разделить на физические и химические. К *физическим* относятся испарение металла и растворение в нем газов.

Испарение связано с перегревом металла на стадии капли. Ввиду высокой температуры столба дуги и ее электродных пятен может испаряться 8...25% металла. Процесс этот неизбежен и вреден, так как он ведет к потере легирующих элементов и загрязнению окружающей среды парами металла (которые при сварке цинка, магния, свинца и некоторых других металлов ядовиты).

Растворение газов в жидком металле. При сварке к таким газам относятся в основном водород и азот (рис. 5.4).

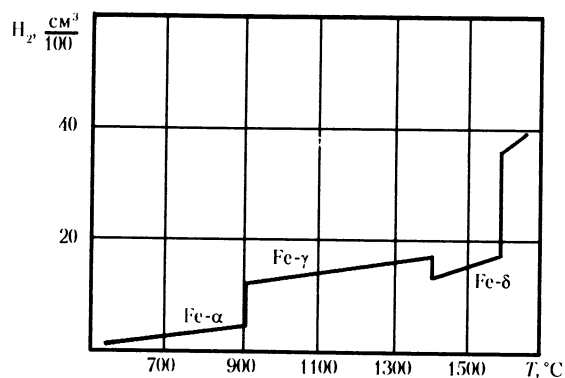


Рис. 5.4. Растворимость водорода в железе (при давлении молекулярного водорода $1 \cdot 10^5$ Па)

Растворение этих газов, содержащихся в газовой фазе над сварочной ванной, характерно почти для всех технических металлов и их сплавов. Азот не растворим лишь в меди и ее сплавах. Кислород, азот и водород в жидком металлическом расплаве находятся в атомарном состоянии. Молекула азота термически прочна и в условиях дуги диссоциирует слабо. Однако в этих же условиях при высокой температуре образуется закись азота по реакции $N_2 + O_2 = 2NO$.

Растворение азота идет по реакции $NO = [N] + [O]$.

При снижении температуры до температуры кристаллизации металла происходит скачок снижения растворимости (см. рис. 5.4), что при большом содержании газа в жидком металле приводит к образованию в металле шва газовой пористости из-за того, что при относительно высокой скорости кристаллизации и малом времени нахождения металла в жидком состоянии газ не может полностью выделиться из расплава. Кроме пористости водород оказывает отри-

цательное влияние на металл с точки зрения понижения его стойкости к образованию холодных трещин. Снижение содержания водорода и азота в металле шва может осуществляться технологическими и металлургическими методами. В первом случае используются все способы защиты от проникновения воздуха в реакцию зону (качественное покрытие на электродах, флюсы, защитные газы, вакуумирование). Эти меры особенно хорошо защищают металл от азотирования. Для борьбы с проникновением водорода очищают проволоку, свариваемые кромки от окисных пленок и органических загрязнений, прокаливают флюсы и электроды, проводят осушку защитных газов.

К металлургическим средствам относят связывание водорода в газовой фазе с кислородом в соединение OH (это реализуется при сварке в CO_2 и смесях других газов с кислородом). При сварке под флюсом водород может связываться фтором в соединение HF. Эти соединения (OH и HF) термически стойки и нерастворимы в жидком металле. Обнаружено также, что окисление сплава понижает растворимость в нем водорода, что используется при сварке в CO_2 , в некоторых марках флюсов (АН-348А и ОСЦ-45) и электродных покрытий.

Идущие в головной части ванны реакции раскисления жидкого металла углеродом образуют выделяющиеся из металла пузырьки CO , которые способствуют удалению из него азота, водорода и кислорода за счет их диффузии в пузырьки угарного газа.

К химическим процессам, происходящим в плавильном пространстве, относятся окисление, раскисление рафинирование и легирование металла сварочной ванны.

Окисление жидкого металла (сплава) представляет собой переход кислорода в раствор жидкого металла. Кислород хорошо растворим в большинстве технических металлов и сплавов (в жидких Fe, Cu, Ni, Ti) и практически нерастворим в жидком Al и Mg. Как правило, содержание кислорода в сталях невелико (0,02...0,002%). При сварке в металле шва оно может увеличиваться до 0,1% за счет перехода из шлака с образованием относительно непрочных окислов Mn и Si, а также окисла железа (FeO). В первом случае кислород поступает в жидкий металл за счет кремний-марганцевосстановительного процесса, приводящего к получению свободного Mn и Si и образования FeO. Впоследствии происходит растворение этого окисла по реакции $(FeO) = [Fe] + [O]$. Образующийся свободный кислород попадает в металл сварочной ванны.

Процесс этот вреден, так как при кристаллизации расплава образуются окислы, которые уменьшают пластичность металла шва.

Кроме того, когда при понижении температуры концентрация кислорода в расплаве начинает превышать предел его растворимости на стадии ванны, происходит окисление легирующих элементов сплава.

Предупредить нежелательные последствия окисления можно, применив в качестве защиты бескислородные и неокислительные флюсы или химически инертные газы (аргон, гелий). Меры эти успешно реализуются при сварке титановых, алюминиевых сплавов и некоторых марок высоколегированных сталей.

Раскисление металла для большинства марок конструкционных сталей – это процесс получения чистых по кислороду металлов. Существует два вида раскисления: диффузионное и осаждающее.

При диффузионном раскислении жидкий металл обрабатывается кислым шлаком (флюсом), который, образуя силикаты, активно растворяет в себе (поглощает) кислород. Однако скорость диффузии кислорода в шлак мала, и при сварке этот путь реализуется трудно.

При осаждающем раскислении на стадии ванны кислород связывается в окислы легирующих элементов, нерастворимые в сплаве. Элементы в данном случае называют раскислителями. Окислы могут оставаться в металле в виде неметаллических включений, загрязняя его и ухудшая такую важную характеристику металла шва как ударная вязкость. Для уменьшения опасности возникновения неметаллических включений раскисление проводят одновременно несколькими раскислителями. Образующаяся при этом смесь окислов (эндогенный шлак) имеет высокую жидкотекучесть и вытесняется из кристаллизующегося металла шва. Наиболее часто применяемыми раскислителями являются кремний и марганец при определенном соотношении их концентраций. Как правило, раскислители вводятся в жидкую ванну через проволоку, покрытие или флюс.

Одним из примеров рафинирования (очистки) металла при сварке является удаление из него таких вредных примесей как сера и фосфор, приводящих к образованию горячих трещин (сера) и охрупчиванию металла шва (фосфор).

Серу удаляют двумя путями: либо с помощью легирующего элемента с большим сродством к сере, либо с помощью основного шлака. Для первого пути часто используют марганец (титан, алюминий): $[S] + [Mn] = MnS$. MnS нерастворим в жидком металле.

К основным окислам относят, прежде всего, окислы кальция: $[S] + (CaO) = (CaS) + [O]$.

В обоих случаях MnS и CaS уходят в шлак. По схеме второго процесса происходит также и связывание фосфора. Таким образом, удалению серы из металла ванны способствует раскисление металла, фосфора – его окисление. Учитывая вредное воздействие серы и фосфора, при разработке сварочных материалов не только регламентируется их повышенная чистота по этим примесям, но и уделяется внимание процессам рафинирования, производящим дополнительную очистку металла от этих примесей.

Легирование металла шва осуществляется разными способами. Основным из них является легирование путем перехода легирующих элементов из проволоки соответствующего химического состава в сварочную ванну. Этот способ широко применим практически при всех способах электродуговой и электрошлаковой сварки. Легирование может осуществляться: также порошками металла или лигатурами, которые вводятся в состав электродных покрытий, керамических флюсов, порошковых проволок. Оба эти способа могут быть совмещены.

В этом случае полнота перехода легирующих элементов в металл шва зависит от сродства их к кислороду – чем оно меньше, тем переход больше. Часто применяется еще один способ – восстановление элементов из окислов, находящихся в шлаке, с помощью основы сплава (для сталей – железа). Он особенно распространен при сварке малоуглеродистых и низколегированных сталей малоуглеродистой проволокой (Св-08А) и кислым флюсом ОСЦ-45 (АН-348А), содержащим большое количество окислов MnO и SiO₂. Здесь за счет кремне-марганце-восстановительных процессов наблюдается легирование металла шва кремнием и марганцем.

Иными словами, легирование металла шва нужными элементами при сварке плавлением может происходить в результате:

- их попадания в металл шва за счет присадочного (электродного) металла при электродуговой и электрошлаковой сварке;
- поступления легирующего элемента из расплавленных при сварке объемов основного металла;
- введения легирующих элементов в состав электродного покрытия или флюса (преимущественно керамического).

Следует отметить, что легирование наплавленного металла и металла шва в результате обменных реакций применяется, как правило, при необходимости введения не очень большого количества легирующих элементов. Наиболее часто эти положения используются при механизированных способах сварки под флюсом.

Легирование воздействием газовой фазы при сварке имеет второстепенное значение, хотя при сварке плавящимся электродом в среде углекислого газа возможно некоторое науглероживание наплавленного металла и металла шва, особенно при низком исходном содержании углерода (обычное содержание углерода по сравнению с его содержанием в проволоке составляет не более 0,05%). Явление это следует рассматривать негативно, и полезным оно может быть лишь при упрочняющей наплавке.

5.2. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

К сварочным относят материалы, прямо или косвенно принимающие участие в формировании сварного шва. Это сварочная проволока, присадочные прутки, неплавящиеся электроды, плавящиеся электроды с покрытием, различного рода флюсы и защитные газы. Сварочные материалы выполняют различные функции, основными из которых являются:

технологические:

- обеспечение стабильного протекания дугового или электрошлакового процесса;
- заполнение зазора между свариваемыми деталями (или разделки) присадочным (наплавленным) металлом;
- формирование усиления и поверхности сварного шва;

металлургические:

- защита зоны сварки от кислорода и азота воздуха;
- легирование расплавленного металла;
- рафинирование жидкого металла (удаление S, P и газов O₂, Ni, Mn);
- модифицирование металла шва с целью измельчения первичной структуры кристаллизации.

Сварочная проволока. Ее используют и для производства плавящихся покрытых электродов, и при механизированных способах сварки в виде непрерывного плавящегося электрода.

Сварочная проволока для сварки стальных конструкций поставляется по ГОСТ 2246-70 (77 марок). Этот стандарт регламентирует химический состав проволоки и ее диаметр (для сварки и изготовления электродов 1,6...8,0 мм). В стандарте обозначение проволоки начинается с индекса «Св», затем дается система легирования и среднее содержание элементов. Так, малоуглеродистая проволока имеет 3 марки: Св-08; Св-08А и Св-08АА. Первые две цифры указывают на среднее

содержание углерода в сотых долях процента, буквы «А» обозначают чистоту металла по сере и фосфору (наиболее чистая Св-08АА).

Леглирующие элементы в проволоке обозначаются по принятой символике буквами: В – ниобий; В – вольфрам; Г – марганец; Д – медь; М – молибден; Н – никель; С – кремний; Т – титан; Ф – ванадий; Х – хром; Ц – цирконий; Ю – алюминий (Св-08ГА; Св-10ГС; Св-08Г2С; Св-06Х19Н9Т; Св-04Х19НАМЗ).

Если в марке указана только буква, это значит, что данный элемент содержится в количестве не более 1%, если после буквы стоит цифра, то она указывает среднее содержание данного элемента. Химический состав некоторых проволок приведен в табл. 5.2. Подобные стандарты существуют и для проволок из медных, алюминиевых и титановых сплавов.

Особый интерес представляет порошковая проволока в виде трубки (часто сложного сечения для увеличения жесткости), заполненной порошковым наполнителем. Этот наполнитель имеет состав, обычно соответствующий составу покрытия основного типа с определенным соотношением массы наполнителя к массе металлической оболочки. Такая проволока, как правило, может не требовать применения флюса или газа (шлакогазовую защиту создает плавящийся наполнитель). Она является универсальным сварочным материалом, пригодна для сварки любых сталей (в зависимости от марки проволоки), для наплавки слоев с особыми свойствами, для подводной сварки. Примеры поперечных сечений порошковых проволок приведены на рис. 5.5.

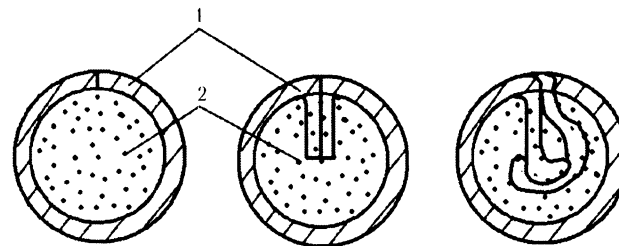


Рис. 5.5. Форма сечения некоторых марок порошковых проволок:

1 – металлическая оболочка; 2 – наполнитель

Современная промышленность во все большем объеме потребляет различного класса порошковые проволоки, причем для полуавтоматической сварки применяется в основном проволока малых диаметров (1,2...1,6 мм). По характеру наполнителя все порошковые проволоки делятся на 3 группы.

Химический состав некоторых марок проволоки для сварки и наплавки, % по массе

Марка проволоки	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	V	W	S		Прочие элементы	
										не более	P		
Низкоуглеродистые проволоки													
Св-08А	≤ 0,1	≤ 0,3	0,035-0,6	≤ 0,1	≤ 0,25	-	-	-	-	-	0,04	0,04	Al ≤ 0,01
Св-08ГА	≤ 0,1	≤ 0,6	0,8-1,1	≤ 0,1	≤ 0,25	-	-	-	-	-	0,025	0,03	
Св-10Г2	≤ 0,12	≤ 0,06	1,6-1,9	≤ 0,2	≤ 0,3	-	-	-	-	-	0,03	0,03	
Низколегированная проволока													
Св-10ГС	≤ 0,1	0,6-0,8	1,4-1,7	≤ 0,2	≤ 0,25	-	-	-	-	-	0,02	0,03	
Св-08Г2ГС	0,05-0,11	0,7-0,9	1,8-2,1	≤ 0,2	≤ 0,25	-	-	-	-	-	0,025	0,03	
Св-08ГСМГТ	0,05-0,11	0,45-0,8	1,0-1,3	≤ 0,3	≤ 0,3	0,2-0,4	-	-	-	-	0,025	0,03	
Св-08ХГС	0,15-0,2	0,9-1,2	0,4-0,7	≤ 0,2	≤ 0,3	-	-	-	-	-	0,025	0,02	
Св-10НМА	0,07-0,12	0,12-0,35	0,4-0,7	≤ 0,2	1,0-1,5	0,4-0,5	-	-	-	-	0,025	0,03	
Св-08ХМНФБА	0,06-0,1	0,12-0,3	0,3-0,6	1,0-1,4	0,6-0,9	0,8-1,0	-	0,2-0,35	-	-	0,03	0,03	N=0,1-0,25

Окончание табл. 5.2

Марка проволоки	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	V	W	S		Прочие элементы	
										не более	P		
Высоколегированная проволока													
Св-Х13	0,09-0,14	0,3-0,7	0,3-0,7	12-14	≤ 0,6	-	-	-	-	-	0,025	0,025	
Св-01Х19Н9	≤ 0,03	0,5-1,0	1,0-2,0	18-20	8-10	-	-	-	-	-	0,015	0,025	
Св-07Х25Н12ГТ	≤ 0,09	0,3-1,0	1,5-2,5	24-25	11-13	-	0,6-1,0	-	-	-	0,02	0,035	
Св-10Х16Н25АМ6	0,08-0,12	≤ 0,6	1,0-2,0	15-17	24-27	5,0-7,0	-	-	-	-	0,015	0,025	N=0,1-0,2
Проволока для наплавки													
Нп-40	0,3-0,45	0,5-0,8	0,17-0,37	≤ 0,25	≤ 0,3	-	-	-	-	-	0,04	0,04	
Нп-30ХГСА	0,27-0,35	0,8-1,1	0,2-0,5	4,0-6,0	≤ 0,4	0,8-1,0	-	0,1-0,3	-	-	0,03	0,03	
Нп-50ХФА	0,46-0,54	0,5-0,8	0,17-0,47	0,8-1,1	≤ 0,4	-	-	0,1-0,2	-	-	0,015	0,02	
Нп-Х20Н80Т	≤ 0,12	≤ 0,7	≤ 0,8	19-23	Основа	-	0,15-0,4	-	-	-			

Примечание: Буква А в конце условных обозначений марок низкоуглеродистых и низколегированных проволок указывает на повышенную чистоту металла по содержанию серы и фосфора.

1. Рутитовые – обеспечивают устойчивую дугу, хорошее формирование шва, мелкокапельный перенос металла (практически отсутствует разбрызгивание). Применяется для сталей с $\sigma_{\text{в}} \leq 650$ МПа. По сравнению со сплошной проволокой дает увеличение производительности труда на 50...70%.
2. Основные – применяют для конструкций высокой ответственности (с повышенными требованиями к ударной вязкости металла шва). Дают крупнокапельный перенос металла в дуге. Разбрызгивание выше, чем у рутитовых проволок. Рекомендуются при выполнении корневых проходов. При многопроходной сварке зачистка каждого прохода не требуется.
3. Металлопорошковые – содержат в наполнителе мало шлакообразующих. Разбрызгивание минимально, зачистки не требуются. Проволока совмещает достоинства рутитовых и основных проволок.

Как правило, применяются проволоки диаметром 1,2...1,6 мм. Сварка ведется либо в чистом CO_2 , либо в смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2$ в разном процентном содержании CO_2 в смеси. Считается, что такой процесс по сравнению со сваркой сплошной проволокой обеспечивает увеличение коэффициента наплавки в среднем в два раза (по данным некоторых фирм, он возрастает для сравниваемых проволок диаметра 1,2 мм с 1,6 до 3,6 кг/г).

В настоящее время и в России разработана и освоена в производстве рутитовая порошковая проволока диаметром 1,2 мм марки 48ПП-84 для сварки низколегированных сталей. Значительное применение порошковые проволоки находят для наплавки различных деталей при ремонте. Так, украинская фирма «Элна» рекомендует целый ряд специальных проволок для наплавки слоев с особыми свойствами. Например, проволока марки ПП-АН163 применяется для наплавки под флюсом судовых гребных валов.

Неплавящиеся электроды не принимают непосредственного участия в формировании шва, а служат лишь для поддержания горения дуги. Изготавливают эти электроды из тугоплавких материалов: графита, угля, вольфрама, циркония, гафния. Графитовые и угольные электроды различаются строением решетки углерода (в графите строение кристаллическое; в угле – аморфное). Графитовые электроды более стойки термически и допускают по сравнению с угольными большую токовую нагрузку при меньшем испарении материала электрода.

При электродуговой сварке наибольшее распространение получили вольфрамовые электроды. Эти электроды поставляются по ГОСТ

23949-80 и имеют несколько модификаций: марка В (чистый вольфрам), марка ВТ (с добавкой 1,0...2,5% окиси тория), марка ВЛ (с добавкой 1,5...2,0% окиси лантана) и марка ВИ (с добавкой 1,5...2,5% окиси иттрия). Добавки этих окислов увеличивают стойкость вольфрамовых электродов и уменьшают их расход при зажигании дуги путем короткого замыкания (рис. 5.6). Наибольшей стойкостью обладают электроды марки ВИ, их и следует применять преимущественно.

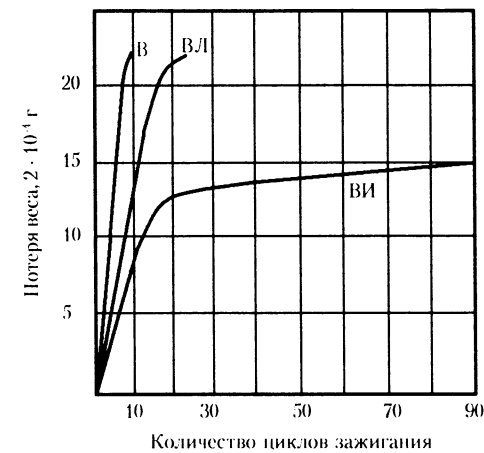


Рис. 5.6. Расход вольфрамовых электродов в зависимости от их химического состава и количества коротких замыканий при зажигании дуги

Покрытые плавящиеся электроды для ручной сварки представляют собой стержень из сварочной проволоки соответствующего состава со специальным покрытием (рис. 5.7). У различных марок электродов масса покрытия составляет 30...50% от массы стержня, толщина покрытия на сторону колеблется 0,5...2,0 мм в зависимости от марки и диаметра электрода.

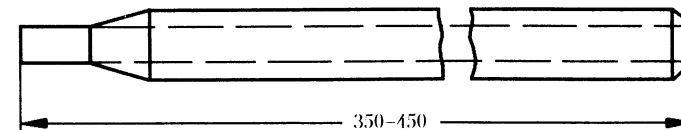


Рис. 5.7. Сварочный электрод с покрытием для ручной электродуговой сварки

Покрытие предназначено для организации газовой и шлаковой защиты расплавленного металла, стабилизации горения сварочной

дуги, легирования и рафинирования жидкого металла сварочной ванны. Образующийся при плавлении электрода шлак способствует также формированию усиления сварного шва.

Комбинированная газошлаковая защита создается за счет:

- а) введения в покрытие соединений, дающих при разложении CO_2 (карбонаты или целлюлозу). CO_2 разлагается в дуге на CO и O ; первый и является защитным газом, вытесняющим воздух из реакционной зоны;
- б) образования шлака в результате плавления введенных в покрытие окислов металлов (CaO , MgO , MnO , FeO , Al_2O_3 и др.) и солей (фторидов и хлоридов металлов).

Для стабилизации сварочной дуги в покрытия вводят легкоионирующие элементы: K и Na . Кроме этого, для получения шлака и газа в покрытия вводятся соединения различных минералов.

Легирование сварочной ванны осуществляется введением в покрытие порошков лигатур (сплавов с железом некоторых металлов: ферромарганец, ферросилиций и т. д.). Связывание мелкозернистых порошков из вышеуказанных соединений после расчета и составления шихты производят путем специальных связывающих веществ, наиболее употребительным из которых является водный раствор натриевого жидкого стекла – силиката натрия или калия. Для улучшения покрывающей способности и получения высокого качества покрытия в него вводят пластификаторы (органические или синтетические соединения).

Весьма упрощенно технология изготовления покрытых электродов выглядит следующим образом. Стержни для электродов рубят из сварочной проволоки в размер на специальных рубочных станках, правят, чистят и обезжиривают. Длина стержней для $d = 4$ мм составляет 450 мм. Длина стержня меньшего диаметра и из высоколегированной проволоки (с высоким электрическим сопротивлением) – 350...200 мм. Для каждой марки электродов в соответствии с нужным химическим составом по специальной методике производится расчет шихты. Необходимые для данного покрытия компоненты проходят контроль химического состава и ряд операций дробления до получения мелкого порошка (пудры). Такое измельчение диктуется необходимостью увеличения скорости и полноты протекания всех химических реакций во время плавления покрытия.

Ферросплавы также измельчают и термообработывают для образования на поверхности частиц окисной пленки, которая предохраняет их от дальнейшего окисления при изготовлении (пассивирование). Компоненты после подготовки таким образом

развешивают в соответствии с проведенным расчетом шихты; после смешения ее компонентов производится тщательное перемешивание для усреднения состава. Полученную сухую шихту замешивают на жидком стекле до необходимой консистенции. Из полученной обмазочной массы изготавливают брикеты, которые параллельно со стержнями поступают на обмазочные прессы, где покрытие с нужной толщиной наносится на стержень по всей его длине. Затем производится зачистка концов электрода (для закрепления в электродержателе и для облегчения зажигания) с последующим нанесением на очищенную поверхность краски, соответствующей марке электрода.

Все эти операции в современных условиях обычно производятся на механизированных поточных линиях. В ряде случаев при небольшом объеме (небольших партиях) электроды изготавливают путем окунания стержней в обмазочную массу с консистенцией сметаны. Вышедшие после обмазки электроды сушат при нормальной температуре 20...48 ч (или 2...4 ч при температуре 40...50 °С), а затем прокалывают для полного удаления влаги из покрытия. Прокалки электродов, содержащих в составе покрытия органические соединения, проводят в течение 1...2 ч при температуре 150...200 °С, без них – 300...400 °С. Затем электроды сортируют, из каждой партии (масса партии колеблется от 2 до 20 т) отбираются пробы для сертификатных испытаний, определяющих свойства наплавленного данной маркой электродов металла (в соответствии с ГОСТ 9466-75). Готовые электроды пакуют в пачки 3...8 кг. Снабжают паспортом с указанием условного обозначения электродов, рекомендуемых режимов сварки, требований к влажности покрытия, режима повторной прокалки и свойств наплавленного металла.

ГОСТ 9466-75 предусматривает классификацию покрытых электродов (рис. 5.8).

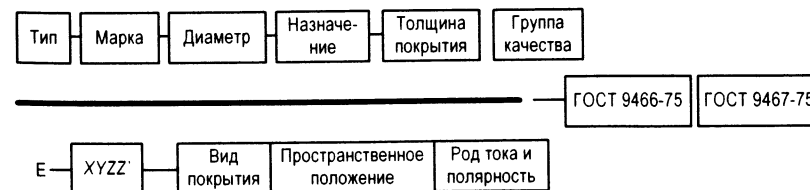


Рис. 5.8. Структура условного обозначения электродов по ГОСТ 9466-75

Области применения электродов в современной промышленности чрезвычайно широки, поэтому электроды по назначению различаются:

- для сварки углеродистых и низколегированных сталей с временным сопротивлением $\sigma_{\text{в}} \leq 600$ МПа – условное обозначение У;
- для сварки легированных конструкционных сталей с $\sigma_{\text{в}} \geq 600$ МПа – Л;
- для сварки теплоустойчивых сталей – Т;
- для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами – В;
- для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами – Н.

Тип электрода. Для электродов назначения У и Л (ГОСТ 9467-75) обозначение включает в себя букву Э (электрод) и цифры, обозначающие среднее значение временного сопротивления разрыву металла, наплавленного этими электродами. Примером могут служить электроды Э38, Э42А, Э50А и так до Э150. Для теплоустойчивых сталей (Т) ГОСТ регламентирует химический состав наплавленного металла (пример Э-12ХМФ). Типы электродов назначения В регламентирует ГОСТ 10052-75. Обозначение: Э-08Х18Н11МЗ.

Электроды всех назначений и типов подразделяются на марки. Последние не определяются государственными стандартами. Марки присваиваются достаточно бессистемно фирмами-разработчиками данного электрода. Марка может определять состав как стержня, так и покрытия.

По толщине покрытия электроды делятся на ряд групп (с тонким покрытием – индекс М, средним – С, толстым – Д, особо толстым – Г). Группы качества определяют: точность изготовления, состояние поверхности покрытия и содержание серы и фосфора в наплавленном металле (всего групп три – 1, 2, 3). Группа индексов (ЕХУZZ') подробно информирует о механических характеристиках наплавленного металла. В зависимости от назначения (типа) электродов параметры этих характеристик могут быть различны (временное сопротивление разрыву, удлинение, температура перехода в хрупкое состояние и др.).

Вид покрытия зависит от его состава. Индекс А – кислое; Б – основное; Ц – целлюлозное; Р – рутиловое. Пространственное положение отражает возможность применения той или иной марки электродов по группам. Например: универсальные (все пространственные положения) – индекс 1 и т. д. Отмечается также род и полярность тока. Иными словами, предложенная классификация дает полную комплексную информацию об электродах. Приведем ее для широко распространенных в судостроении электродов:

Э46-УОНИ-13/45-3.0-УД2

Е-432(5)-Б10

ГОСТ 9466-75

ГОСТ 9467-75

В рабочей технологии, как правило, такая запись не нужна и она упрощается до

УОНИ-13/45-3.0-2

ГОСТ 9466-75

Существуют специальные электроды для подводной сварки. Их поверхность покрыта электроизолирующим лаком. Для сварки конструкционных низколегированных сталей средней прочности применяются электроды марки ЛКИ-1П и ЛКИ-2П. Последние имеют стержень из высокоуглеродистой проволоки и толстое покрытие рутилового типа, содержащее определенное количество термита.

Химический состав и свойства наплавленного металла некоторых электродов, применяемых для сварки наиболее употребляемых низколегированных конструкционных сталей, приведены в табл. 5.3; типы и марки некоторых электродов для сварки ряда корпусных и машиностроительных конструкций с указанием области их применения – в табл. 5.4.

Таблица 5.3

Химический состав и механические свойства наплавленного металла при сварке некоторыми марками покрытых электродов

Марка электрода	Химический состав наплавленного металла, % по массе								Механические свойства наплавленного металла			
	С	Si	Mn	Cr	Ni	S	H	σ_s , МПа	σ_b , МПа	δ_5 , %	KCV, Дж/см ² (+20%)	
												не более
АНО-5	До 0,1	0,1–0,2	0,6–0,9	До 0,15	До 0,30	0,04	0,04	345	460	25	135	
ОММ-5	0,06–0,15	0,06–0,1	0,5–0,9	До 0,15	До 0,80	0,04	0,04	295	450	25	118	
УОНИ 13/45А	До 0,11	0,18–0,35	0,35–0,65	До 0,15	До 0,30	0,03	0,03	325	450	26	125	
УОНИ 13/55	0,08–0,13	0,2–0,45	0,8–1,2	До 0,15	До 0,80	0,03	0,03	390	490	25	195	

Таблица 5.4

Некоторые типы и марки электродов для сварки сталей, применяемых в корпусных и машиностроительных судовых конструкциях

Назначение электродов	Полное обозначение электродов
Сварка конструкционных углеродистых сталей БСт3, ВСт3сп, литых сталей 20Л, 25Л, низколегированных конструкционных 09Г, 10ХСНД, МС-1 и корневые проходы соединений и литья из стали 08ГДН и 08ГДНФ	<u>Э42А-УОНИ-13/45-Ж-УД1</u> ГОСТ 9466-75 Е-412(3)-Б20 ГОСТ 9467-75
Сварка конструкций из углеродистых сталей ВСт3, ВСт3сп	<u>Э46-АНО4С-Ж-УД1</u> ГОСТ 9466-75 Е-431(3)-322 ГОСТ 9467-75
Механизированная сварка конструкций из углеродистых и низколегированных сталей Ст3, 10ХСНД, 09Г2 в нижнем положении наклонным электродом. То же, ручная сварка	<u>Э46А-ИТС-1-5-Ж-УД1</u> ГОСТ 9466-75 Е-41 2(3)-Б20 ГОСТ 9467-75
Сварка углеродистых и низколегированных сталей Ст3, 09Г2, 10ХСНД, 10Г2СГД. Вертикальные швы сверху вниз.	<u>Э50А-АН09-Ø-УД1</u> ГОСТ 9466-75 Е-50 2-Б16 ГОСТ 9467-75
Сварка конструкций из стали Ст3, Ст4, ВСт3сп, 10ХСНД, 10Г2С1Д-40 и им подобных со стороны подверженных воздействию морской воды	<u>Э50А-Э-138/50Н-Ø-УД1</u> ГОСТ 9466-75 Е-50 3-Б20 ГОСТ 9467-75
Сварка конструкций из легированных высокопрочных сталей 14ХГСНМФР	<u>Э60-48н-Ø-ЛД1</u> ГОСТ 9466-75 Е-10ХН2М5-Б20 ГОСТ 9467-75

Окончание табл. 5.4

Назначение электродов	Полное обозначение электродов
Сварка конструкций из теплоустойчивых сталей Х5М, 12Х5МА, 15Х5МФЛ	<u>Э-10Х11НВМФ-КТН-10-62-Ø-ВД2</u> ГОСТ 9466-75 Е-033-Б20 ГОСТ 9467-75
Сварка конструкций из хромоникелевой аустенитной стали 12Х1810Н10Т при умеренной агрессивности коррозионной среды	<u>Э-08Х18Н11М3-ЭА400/10У-Ж-ВД1</u> ГОСТ 9466-75 Е-000-Б20 ГОСТ 9467-75

Флюсы для дуговой сварки служат для защиты реакционного сварочного пространства от газов атмосферы, стабилизации горения дуги и легирования металла шва. Они классифицируются по химическому составу, назначению и способу изготовления.

Флюсы могут изготавливаться плавными и керамическими. **Плавленные** флюсы представляют собой сплавы окислов и солей металлов. Упрощенно технология изготовления этих флюсов состоит из следующих этапов: расчет шихты, подготовка компонентов (их размельчение), плавление и обработка готового флюса (грануляция, сушка, просеивание). Плавление флюса проводится в дуговых или пламенных печах. Хорошо выдержанный расплав выпускают из грануляции из печи. Грануляция может быть мокрой или сухой. В первом случае расплав тонкой струей выпускается в емкость с водой, где он и затвердевает в виде нитей и зерен различной величины. После сушки (250...350 °С) его дробят и просеивают на ситах с разным количеством отверстий, отсеивая мелкую фракцию от более крупной. В зависимости от химического состава флюса цвет зерен меняется от светло-серого до коричневого и черного. Температура выпуска струи расплава и химсостав флюса определяют вид зерен: они могут иметь стекловидное и пемзовидное строение. Плавленные флюсы классифицируют по назначению, химической активности шлака, химическому составу.

Для сварки подавляющего большинства низкоуглеродистых и низколегированных сталей, меди и ее сплавов применяются обычно кислые кремнисто-марганцевистые флюсы, содержащие большое количество SiO_2 и MnO . Химическая активность флюсов (шлаков), т. е. их способность окислять, легировать, рафинировать, непосредственно связана с составом основного металла и электродной (присадочной) проволоки. Поэтому для сварки стали определенного состава комплексно выбирают системы флюс – проволока. Отсюда и назначение флюсов – каждый выбирается для сварки определенных материалов. В табл. 5.5 приведены некоторые типичные примеры выбора таких систем.

Строение зерен флюса отражается в наименовании его марки: П – пемзовидный; С – стекловидный. Если зерна флюса имеют размер 0,1...1,6 мм, то к марке добавляют букву М. Наиболее распространенными флюсами для сварки низкоуглеродистых и низколегированных судостроительных сталей являются кислые кремнемарганцевистые флюсы марок ОСЦ-45 и АН-348А.

Керамические флюсы, прежде всего, отличаются способом изготовления. Технология их изготовления весьма схожа с технологией изготовления покрытий (особенно в первой ее части). Состав их может быть различен. После тщательного смешивания сухой шихты и приготовления замеса последний продавливается через сито, образуя частички определенных размеров. Затем они обжигаются в печи, приобретая прочность. Эти флюсы позволяют относительно легко легировать шов, добавляя во флюс порошки любых металлов или лигатур. Часто применяются для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами.

Положительным является возможность изготовления небольших партий любого химического состава. Отрицательным – трудность получения равномерного химического состава шва из-за возможной сепарации частичек различного удельного веса при приготовлении замеса и относительная дороговизна флюса.

Защитные газы, применяемые при сварке, делятся на активные и пассивные.

Ярким представителем *активных* газов является углекислота CO_2 . Углекислота для сварки изготавливается по ГОСТ 8050-76 (углекислота сварочная). Она поставляется I и II сортов и отличается от пищевой углекислоты нормированием содержания паров воды (соответственно 0,178 и 0,515 H_2O в 1 $\text{m}^3 \text{CO}_2$). В исключительных случаях возможно применение пищевой углекислоты при условии

Таблица 5.5

Химический состав и выбор системы флюс – проволока для разных областей применения

Тип флюса	Марка флюса	Химический состав, % по массе, не менее										Марка проволоки	Область применения
		SiO_2	MnO	Al_2O_3	CaO	MgO	CaF_2	K_2O Na_2O	H_2O_3	S	P		
Высокремнистый, высокомарганцевистый (сильноокислительный)	ОСЦ-45	40	40	$\leq 4,5$	$\leq 6,5$	$\leq 2,5$	8	—	2	0,15	0,15	Св-08А	Сварка углеродистых и низколегированных сталей БСтЗ, ВСтЗст, 09Г2, 10ХСНД и т.д.
	АН-348А	42	36	$\leq 4,5$	$\leq 6,5$	6	5	—	2	0,15	0,15		
	ФЦ-9	39	39	11	$\leq 6,5$	$\leq 2,5$	3	—	2	0,1	0,1		
Кремнемарганцевистый (окислительный)	АН-8	38	24	12	5	6	16	—	3,5	0,15	0,15	Св-08ГА Св-09Г2 Св-08ГСМТ	ЭШС сталей БСтЗ, ВСтЗст, 09Г2, 10ХСНД
	АН-22	20	8	20	13	13	21	1,5	1,0	0,05	0,05	Св-08Х20Н9ГТТ	ЭШС стали типа 12Х18Н10Т
	АН-17М	20	3	23	16	10	24	—	4	0,05	0,05	Св-08ХГСМОА Св-08ХН2Г2СМО	Сварка среднелегированных сталей типа 14ХМНДФР

Тип флюса	Марка флюса	Химический состав, % по массе, не менее										Марка проволоки	Область применения
		SiO ₂	MnO	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	CaF ₂	K ₂ O Na ₂ O	H ₂ O ₃	S	P		
Кремнистый безмарганцевис- тый флюс (слабоокисли- тельный)	АН-26	30	3	20	5	17	24	-	1,5	0,1	0,1	Св-04Х19Н9 Св-04Х19Н11М3 Св-08Х19Н9Ф2С2	Сварка аустенитных сталей типа 12Х19Н10Т
	48-ОФ-10 ^а)	10	До 1	30	8	12	40	-	-	-	-	Св-08Х20Н9ГТ Св-10Х16Н25АМ6 Св-9Х16Н25АМ6Ф	
Безмарганцевис- тый, бескремнистый (неокислитель- ный)	48-ОФ-6 ^а)	≤ 4	≤ 0,3	24	18	≤ 3	52	-	1,5	0,5	0,04	Аустенитная хромоникелевая разных составов	Дуговая и ЭШС хромоникелевых сталей, работающих в условиях сильной коррозионной среды при повышенных температурах
	АНФ-5	2	-	-	-	-	77	21	-	-	-		
Бескислородный	АНФ-22	-	-	-	2	-	88	10	-	-	-		

Примечание: Марки регламентируются ГОСТ 9097-60 за исключением^а, которые поставляются по техническим условиям.

тщательного осушения имеющейся в баллоне влаги. Углекислоту транспортируют и хранят в баллонах или цистернах большой емкости в жидком состоянии с последующей газификацией и снабжением сварочных постов через рампу. Баллон емкостью 40 л содержит 25 кг CO₂, дающего при испарении 12,5 м³ при давлении 760 мм рт. ст. Баллон окрашен в черный цвет с надписью желтого цвета.

При выборе системы CO₂ – сварочная проволока следует иметь в виду наличие большого количества свободного кислорода, образующегося в дуговом промежутке за счет диссоциации молекулы CO₂ → CO + O. Свободный кислород способствует окислению легирующих элементов, что делает необходимым их компенсацию через проволоку. В низколегированных сталях такими элементами являются Si и Mn, средство которых с кислородом весьма велико. Поэтому для сварки таких сталей как 09Г2 или 10ХСНД в CO₂ нельзя применять проволоку Св-08А; наиболее широко здесь применяется проволока Св-08Г2С (или другая марка, содержащая в своем составе компенсируемые элементы).

К инертным газам, применяемым при сварке, относятся аргон, гелий и их смеси. Эти газы не вступают в реакцию с любым из расплавленных металлов и практически не растворяются в них. Они обладают весьма различными свойствами, что и определяет особенности формирования швов, в них выполненных. Так, плотность аргона (1,78 кг/м³) на порядок больше плотности гелия (0,178 кг/м³), теплопроводность гелия (0,1386 Вт/см · К), значительно больше (как и потенциал ионизации), чем у аргона (0,046 Вт/см · К).

Аргон производится при получении кислорода из воздуха (его содержание в воздухе составляет 0,935% объема). После надлежащей очистки, аргоном заполняются стальные баллоны емкостью 40 л под давлением 150 · 10⁵ Па. При весьма высоком расходе аргона экономически целесообразно поставлять аргон в жидком виде (его T_{крит} = -185,5 °С). Таким он хранится в сосудах типа Дьюара значительной вместимости. Так, в выпускаемых отечественной промышленностью автомобильных газификационных установках АГУ-2М с резервуаром емкостью 1,4 м³ можно хранить и транспортировать жидкий аргон, кислород и азот при температуре окружающей среды от +50 до -40 °С. Эти установки позволяют работать в режиме газификации на трубопровод либо на заполнение баллонов. Существуют автомобильные установки большой емкости АНУ-8К и железнодорожные емкости-цистерны типа 8Г-5Ц (объем последней 34 м³, в нее входит 32 т газа).

По ГОСТ 10157-79 аргон выпускается высшего сорта (99,99%) и первого (99,98%). Гелий из-за особенности своих теплофизи-

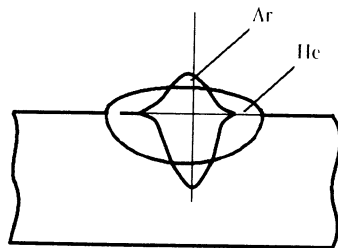


Рис. 5.9. Изменение формы проплавления наплавленного валика в зависимости от применяемого инертного газа

ческих свойств изменяет условия провара и формирование шва, увеличивая его ширину и делая проплавление более плавным по сравнению с аргоном (рис. 5.9). В воздухе содержание гелия чрезвычайно мало, его получают из природных газов методом фракционной перегонки.

Промышленность поставляет гелий в соответствии с ГОСТ 20461-75 трех сортов: марок А (99,993%), Б и В (99,990%). Поставляется в стальных баллонах водяной емкостью 40 л при давлении $150 \cdot 10^5$ Па. Цвет баллона коричневый, надпись белого цвета. Как и аргон, может поставляться в сжиженном виде. В связи с тем, что гелий легче аргона в 10 раз, его расход при сварке увеличивается в 1,5–3 раза. Гелий дороже аргона из-за большей сложности его получения.

Часто применяют смеси аргона и гелия, а также смеси аргона и углекислого газа в различных пропорциях. Такие смеси могут значительно изменять условия формирования сварного шва и широко применяются в промышленности.

Практически возможно составление сложных многокомпонентных газовых смесей любого состава. Это позволяет за счет изменения теплофизических параметров смеси регулировать параметры проплавления и формирования шва, а также повышать производительность и качество сварных соединений. Так, смеси, содержащие гелий, улучшают проплавление металла, изменяют его форму и увеличивают производительность процесса. Применение газовых смесей при полуавтоматической сварке плавящимся электродом уменьшает разбрызгивание, не требует последующей зачистки перед покраской. Наиболее универсальная газовая смесь при сварке плавящимся электродом (К-2) для сварки конструкционных сталей состоит из 82% Ar и 18% CO₂. Смесь К-3 состоит из 92% Ar, 6% CO₂ и 2% O₂. Эти смеси разработаны для сварки листо-

вого материала, дают стабильно горящую дугу с низким разбрызгиванием, обеспечивают небольшое усиление шва с гладким профилем и глубоким проваром. Газовая смесь НП-1 состоит из 85% He, 13,5% Ar и 1,5% CO₂. Дает чистые швы с гладким профилем и обеспечивает получение поверхности шва практически без окисления. Хорошо подходит для сварки тонких материалов за счет возможности получения высоких скоростей сварки, что обеспечивает низкие деформации. Смесь НП-3 состоит из 38% He, 60% Ar и 2% CO₂. Обеспечивает высокую стабильность дуги, низкий уровень разбрызгивания, рекомендуется для сварки толщин более 10 мм. Универсальной газовой смесью является смесь НП-2, состоящая из 55% He, 43% Ar и 2% CO₂; она подходит для сварки материала любой толщины.

6. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ И СБОРКИ КОНСТРУКЦИЙ ПОД ЭЛЕКТРОСВАРКУ

6.1. ТРЕБОВАНИЯ К СВАРНЫМ ШВАМ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

При строительстве стальных корпусов судов применяются три основных процесса дуговой сварки плавящимся электродом: ручная покрытыми электродами, механизированная под флюсом и механизированная в защитном газе. В небольшом объеме применяется контактная точная сварка, в том числе в сочетании с клеем холодного отверждения в конструкциях быстроходных судов с корпусами из алюминиевых сплавов и сталей небольшой толщины. Дуговые процессы сварки применяют на участках предварительной сборки и сварки узлов, секций и блоков, на построечном месте при формировании корпуса, в цехах, на открытых площадках, на плаву и т. п. Основные виды сварных соединений (стыковые и тавровые) сваривают в нижнем, вертикальном, горизонтальном, потолочном и других промежуточных положениях. Области применения дуговых процессов сварки приведены на рис. 6.1.

Высокая ответственность корпусов судов в условиях эксплуатации предъявляет соответствующие требования к качеству как швов сварных соединений, так и сварных конструкций в целом. В условиях эксплуатации сварные соединения испытывают статические, динамические и вибрационные нагрузки. Они могут работать в условиях агрессивных сред (морская вода) и др. Требования к сварным соединениям зависят от многих условий и конкретизируются только применительно к конкретным условиям их работы. Поэтому сформулировать их в общем виде можно лишь приближенно.

Сварные соединения должны обеспечивать достаточную работоспособность конструкции в заданных условиях эксплуатации при минимальных затратах труда и ресурсов на их изготовление, т. е. сварное соединение должно сохранять в течение всего срока эксплуатации изделия необходимую и достаточную прочность,



Рис. 6.1. Области применения дуговых способов сварки при изготовлении судовых корпусных конструкций

Требования к размерам соединений при сборке соединений под сварку под флюсом по ГОСТ 87130-79

Эскиз соединения при сборке и его конструктивные элементы и размеры	Толщина S_1 , мм	b , мм		c , мм		Назначение соединения для шва с условным обозначением
		номин.	пред. откл.	номин.	пред. откл.	
	2 2-4 4-6 6-10	0 1 1,5 2	± 1 ± 1 ± 1 ± 1	-- -- -- --	-- -- -- --	C4
	5-6 7-14 16-18 20	3 4 5 6	+2 +2 +2 +2	-- -- -- --	-- -- -- --	C4
	2 2-3 3-4 5-20	0 0 0 0	± 3 +0,3 +0,8 +1	-- -- -- --	-- -- -- --	C4
	14-16 16-20 20-30	-- -- --	-- -- --	6 7 8	± 2 ± 2 ± 2	C21
	18-20	См. эскиз				C25
	3 3-5 5-40	0 0 0	+0,8 +1 +1,5	-- -- --	-- -- --	T3
	8-30	См. эскиз				T7

выносливость и устойчивость в реальных условиях эксплуатации. Прочность сварного соединения зависит от механических свойств металла шва и околошовной зоны; от конфигурации шва и его размеров; от наличия и характера дефектов в сварном шве; от стойкости к хрупким разрушениям, коррозионным разрушениям в морской воде и других средах.

Требования к прочностным и пластическим свойствам металла шва и сварного соединения зависят от свойств электродного (присадочного) основного металла конструкции, типа соединения и условий его работы. Чаще всего эти требования устанавливаются в зависимости от характеристик основного металла. Этот же подход применяется и в отношении других требований: величины ударной вязкости при заданной температуре испытаний, значения критической температуры перехода в хрупкое состояние, стойкости к коррозии и др. Выполнение всех требований для литого металла шва и металла ЗТВ достаточно сложно и во многих случаях достигается за счет применения специальных (усложненных) техник и технологий сварки и сварочных материалов.

К сварным швам стыковых соединений предъявляется требование обеспечения полного (на всю толщину) провара соединяемых элементов и плавного перехода от металла шва к основному металлу, чем достигается повышение работоспособности соединения при динамических, вибрационных и других нагрузках. Для угловых швов задаются требования к их размерам, установленным расчетным путем или по технологическим соображениям, при этом важно выдерживать плавное очертание (не выпуклое) поверхности шва с целью снижения геометрической концентрации напряжений и повышения работоспособности шва при вибрационных нагрузках. В тавровых соединениях, которые в эксплуатационных условиях не испытывают нагрузок, к угловым швам не предъявляются требования полного провара. А в соединениях, испытывающих постоянные нагрузки, полный провар обязателен и обеспечивается за счет одностороннего скоса кромок при толщине свариваемого металла более 8,0 мм и двухстороннего при толщине металла более 16,0 мм.

Полный провар швов угловых соединений достигается в соединениях с односторонним скосом кромок при толщине металла 8,0 мм и более и с двухсторонним скосом при сварке металла толщиной 20,0 мм и более. Качество сварных швов (их размеры, форма и глубина проплавления металла) зависят от точности соблюдения заданных размеров конструктивных элементов, подготовки кромок в собранном соединении под сварку.

Эскиз соединения при сборке и его конструктивные элементы и размеры	Толщина, S , мм	b , мм		c , мм		Назначение соединения для шва с условным обозначением
		номин.	пред. откл.	номин.	пред. откл.	
	16-40	См. эскиз				T8

Таблица 6.2

Требования к размерам соединений при сборке соединений под сварку в двуокиси углерода по ГОСТ 14771-76

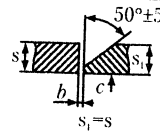
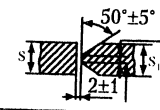
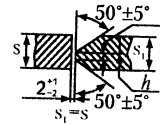
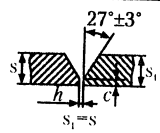
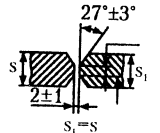
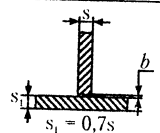
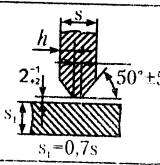
Эскиз соединения при сборке и его конструктивные элементы и размеры	Толщина S , мм	b , мм		c , мм			Назначение соединения для шва с условным обозначением
		номин.	пред. откл.	номин.	пред. откл.	α , град	
	3-6 7-10 11-12	0 1,5 2	± 1 ± 1 ± 1	- - -	- - -	- - -	C7
	3-11 12-6	1 2	± 1 $+1$ -2	1 2	± 1 $+1$ -2	- $40^{\pm 2}$	C12
	11-60	2	$+1$ -2	2	$+1$ -2	$20^{\pm 2}$	C17
	3-60	2	$+1$ -2	2	$+1$ -2	$20^{\pm 2}$	C21

Эскиз соединения при сборке и его конструктивные элементы и размеры	Толщина S , мм	b , мм		c , мм			Назначение соединения для шва с условным обозначением
		номин.	пред. откл.	номин.	пред. откл.	α , град	
	22-120	2	$+1$ -2	2	$+1$ -2	$20^{\pm 2}$	C25
	3-10 11-30 32-60	0 0 0	$+1$ $+2$ $+3$	1 2 2	± 1 $+1$ $+1$ -2	$45^{\pm 2}$ $45^{\pm 2}$ $45^{\pm 2}$	T6
	3-10 11-30 32-60	0 0 0	$+1$ $+2$ $+3$	1 2 2	± 1 $+1$ -2 $+1$ -2	$45^{\pm 2}$ $45^{\pm 2}$ $45^{\pm 2}$	T7
	10-80	2	$+1$ -2	2	$+1$ -2	$45^{\pm 2}$	T8

В табл. 6.1-6.3 в качестве примера показаны предусмотренные государственными стандартами требования к некоторым соединениям под сварку. Как следует из таблиц, значения конструктивных элементов соединений под сварку (с колебаниями зазоров, углов разделки кромок и др.) определяют различный объем наплавленного металла на единицу длины шва для заданного режима сварки и, соответственно, возможность формирования каждого сварного шва с изменяющимися размерами по длине.

Таблица 6.3

Требования к размерам соединений при сборке под ручную сварку по ГОСТ 5264-80

Эскиз соединения под сварку и его конструктивные элементы	Толщина соединения S , мм	h , мм	$c = b$, мм		Назначение соединения для шва с условным обозначением
			номин.	пред. откл.	
	4-8 8-26	- -	1 2	± 1 +1 -2	C8
	12-30 32-60	5-14 15-29	- -	- -	C11
	12-30 31-60	8-19 20-40	- -	- -	C13
	3-8 10-50	- -	1 2	± 1 +1 -2	C18
	12-30 31-60	5-16 17-29	- -	- -	C21
	2,0-9,0 10-30		0 0	-2 +3	T1
	4-6 8-26	- -	1 2	± 1 +1 -2	T6

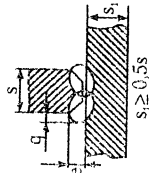
Заданный нормативными документами режим сварки в реальных условиях не будет строго постоянным по всей длине шва и не останется неизменным при сварке даже в пределах выполнения каждого шва. Колебания напряжения во внешней сети, изменения скорости подачи сварочной проволоки и т. п. вызывают неуправляемое изменение режима сварки (сварочного тока, напряжения дуги и др.). Это вызывает соответствующие изменения размеров швов и параметров проплавления. На качество формирования размеров швов оказывает влияние также положение невидимого под флюсом конца электрода относительно кромок соединения. В результате этого возможно образование непроваров и других дефектов. По указанным причинам размеры сварных швов, приведенные в государственных стандартах для основных дуговых процессов сварки, установлены по технологическим возможностям и с запасом, обеспечивающим их достаточную работоспособность (табл. 6.4-6.6). Значительные колебания размеров швов приводят к повышенным расходам сварочных материалов, электроэнергии, сварочным деформациям, необходимости ремонта сварных швов и т. д. Поэтому при разработке технологического процесса сварки уделяется большое внимание выбору способов и режимов сварки. Они сводят к минимуму образование дефектов в сварных швах (непроваров, трещин, пор, шлаковых включений и др.), включая резкие колебания в размерах швов и их плавное сопряжение с основным металлом.

Требования к размерам швов сварных соединений при сварке под флюсом по ГОСТ 8713-70

Условное обозначение сварного соединения	Эскиз сварного соединения и конструктивные элементы шва сварного соединения	Толщина δ , мм	e, мм, не более		e ₁ , мм, не более		q, мм		q ₁ , мм	
			номин.	пред. откл.	номин.	пред. откл.	номин.	пред. откл.		
C4		2-3	12	±1,5	См. ГОСТ		1,5	±1,0	1,0	±1,0
C4		5-6	23	-	12	±4	1,5	±1,0	1,5	±1,0
		7-14	28	-	14	±4	1,5	±1,5	1,5	-1,0
		16-20	36	-	16	±4	2,0	±1,5	2,0	±1,5
C7		2-3	8,5-10 12-19 23-28	±4	См. ГОСТ		1,5	±1,0	1,5	±1,0
		4-9					2	-1,5	2	-1,0
		9-20					3	+1,5	3	+1,5
C21		14	20	±4	-	2	+1,0 -1,5	-	-	

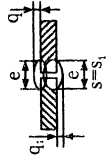
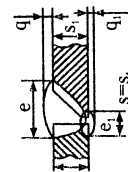
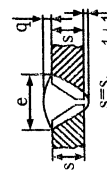
Продолжение табл. 6.4

Условное обозначение сварного соединения	Эскиз сварного соединения и конструктивные элементы шва сварного соединения	Толщина δ , мм	e, мм, не более		e ₁ , мм, не более		q, мм		q ₁ , мм
			номин.	пред. откл.	номин.	пред. откл.	номин.	пред. откл.	
C25		24-28	24	±4	-	-	2,5	+1,0 -2,0	-
		28-48	28-32	±5	-	-	2,5	+1,5 -2,0	-
		48-60	36-39	±5	-	-	2,5	+1,5 -2,0	-
T3		Требования к катетам угловых швов см. ГОСТ 8713-79							
T7		8-14	15-22	±3	-	-	4-5	±2	-
		14-26	30-39	±4	-	-	6-8	±2	-
		26-30	39-45	±5	-	-	9-10	±2	-

Условное обозначение сварного конструктивного элемента шва сварного соединения	Эскиз сварного соединения и конструктивные элементы шва сварного соединения	e, мм, не более		q, мм		q ₁ , мм	
		номин.	пред. откл.	номин.	пред. откл.	номин.	пред. откл.
	16-18	25	+4 -7	4	±2	-	-
	18-22	30	+4 -8	5	±2	-	-
	22-26	36	+4 -10	6	±2	-	-
	26-30	40	+4 -11	7	±2	-	-
	30-36	50	+4 -12	8	±2	-	-
	36-40	56	+4 -16	9	±2	-	-

Требования к размерам швов сварных соединений при сварке в дуговой среде по ГОСТ 14771-76

Таблица 6.5

Условное обозначение сварного конструктивного элемента шва сварного соединения	Эскиз сварного соединения и конструктивные элементы шва сварного соединения	e, мм, не более		q, мм		q ₁ , мм	
		номин.	пред. откл.	номин.	пред. откл.	номин.	пред. откл.
C1		8	-	1,5	±1	-	-
		99-14	-	2	±1,5	-	-
C12		6-14	±2	1	±1 +1	2	±1
		18-22	±3	2	-2 +1	2	±1
		26-42	±4	2	-2 +1	2	±1
		46-54	±5	2	+1 -2	2	±1
C17		10	±2	1	±1	-	-
		13-36	±4	2	+1 -2	-	-
		40-50	±4	2	+1 -2	-	-

Условное обозначение сварного соединения	Эскиз сварного соединения и конструктивные элементы шва сварного соединения	Толщина S , мм	e , мм, не более		e_1 , мм, не более		q_1 , мм	
			номин.	пред. откл.	номин.	пред. откл.	номин.	пред. откл.
C21		3-11	±2	±2	8	±2	1	±1
		12-18	±3	±3	8	±2	2	±1
		22-60	±4	±4	10	±2	2	±1
C25		6-20	±2	±2	-	-	1	-
		22-45	±3	±3	-	-	2	-
		48-80	±4	±4	-	-	2	-
		85-100	±5	±5	-	-	2	-
		105-120	±6	±6	-	-	2	-

Условное обозначение сварного соединения	Эскиз сварного соединения и конструктивные элементы шва сварного соединения	Толщина S , мм	e , мм, не более		e_1 , мм, не более		q_1 , мм	
			номин.	пред. откл.	номин.	пред. откл.	номин.	пред. откл.
T6		3-10	±2	±2	-	-	-	-
		11-18	±3	±3	-	-	-	-
		20-40	±4	±4	-	-	-	-
		42-60	±5	±5	-	-	-	-
T7		3-10	6-12	±2	±2	±2	6-12	
		11-18	16-20	±3	±3	±3	16-20	
		20-40	24-40	±4	±4	±4	24-42	
		42-60	44-52	±5	±5	±5	16-54	
T8		6-9	8	±2	±2	-	±2	
		14-24	12-14	±3	±3	-	±3	
		26-42	11-24	±4	±4	-	±4	
		45-80	28-48	±5	±5	-	±5	
								См. ГОСТ

Таблица 6.6

Требования к размерам швов сварных соединений при ручной сварке
по ГОСТ 5264-80

Условное обозначение шва сварного соединения	Эскиз сварного соединения и конструктивные элементы шва сварного соединения	Толщина соединений S , мм	е, мм	е ₁ , мм	q, мм	
			не более		номин.	пред. откл.
С8		4-8	12-18	$8-10^{+1}_2$	0,5	+1
		10-26	22-41	10^{+1}_2	0,5	-0,5 +2 -0,5
С11		12-30	18-28	-	0,5	+2
		32-60	32-50	-	0,5	-0,5 +3 -0,5
С13		12-30	22-36	14-22	0,5	+2
		32-60	40-64	24-36	0,5	-0,5 +3 -0,5
С18		3-8	10-14	8	0,5	+1,5
		10-28	20-38	10	0,5	-0,5
		30-50	44-66	12	0,5	+2,0 -0,5 +3,0 -0,5
С21		12-30	16-26	-	0,5	+2,0
		32-60	28-42	-	0,5	-0,5 +3,0 -0,5
Т6		4-10	10-20	-	3	+1
		12-16	22-28	-	4	-3 ±3
Т9		28-34	26-30	-	6	±3
		36-46	32-38	-	9	±3
Т10		12-22	16-20	-	3	±3
		24-34	22-26	-	5	±3
		36-46	28-30	-	6	±3
		48-64	34-40	-	9	±3
		66-82	42-48	-	11	±3
84-100	52-60	-	13	±3		

6.2. ТРЕБОВАНИЯ К СТАЛЬНОМУ ПРОКАТУ, ПРИМЕНЯЕМОМУ ДЛЯ КОРПУСА СУДА

Корпуса судов изготавливают из углеродистых (марок А, В, Д, Е, ВСтЗсп, ВСтЗис и др.) и низколегированных (марок А32, Д32, Е32, А36, В36, 09Г2, 10ХСНД и др.) сталей. К этим сталям предъявляется комплекс требований по механическим свойствам, по коррозионной стойкости в различных средах и др. На судостроительные заводы стали поступают на склад в виде листового и профильного проката. Листовая и профильная сталь допускаются к приемке на склад только при наличии сертификата и при условии соответствия сертификатных данных требованиям государственных стандартов и технических условий, регламентирующих механические свойства и другие показатели качества стали. На складе сталь подвергается наружному осмотру и обмеру.

Листовую сталь, скомплектованную по размерам и маркам, хранят на складе в вертикальном положении в стеллажах или в горизонтальном положении в пачках. В условиях комплексной механизации листовую сталь хранят в пачках. При хранении в стеллажах принимаются меры, исключающие возможность повреждения кромок и поверхности листов при установке новых листов или извлечении листов из стеллажа. А нижние листы при хранении в пачках и нижние кромки листов при хранении в стеллажах устанавливают на деревянные подкладки. Профильную сталь, скомплектованную по маркам стали и размерам, хранят в горизонтальном положении в стеллажах, выполняя условие недопущения остаточного изгиба стали при ее провисании между кронштейнами стеллажей.

Транспортировку листовую и профильную стали со склада в цех и внутри цеха производят на вагонетках, железнодорожных платформах, автомашинах и по рольгангам.

Листовой стальной прокат, особенно тонколистовой, поступивший с металлургического завода, имеет различные искривления, возникшие в процессе производства стали. Тонкие листы вследствие небольшой поперечной жесткости теряют устойчивость по кромкам и имеют волнистость.

Важнейшим требованием, предъявляемым к стальному прокату, предназначенному для деталей корпуса судна, является его технологичность, т. е. способность без существенного ухудшения механических свойств и разрушения подвергаться различным видам технологических операций (правке, очистке, гибке, механической и тепловой резке и др.).

Наличие в листовом прокате различных искривлений, а также окалины и ржавчины на его поверхности оказывает отрицательное влияние на качество выполнения технологических процессов и качество изготовленных деталей и конструкций. Поэтому перед запуском листового и профильного проката для изготовления деталей он подвергается предварительной обработке (правке, очистке и грунтовке). Допустимые местные искривления выправленного проката приведены в табл. 6.7.

Таблица 6.7

Допустимые местные искривления выправленного листового и профильного проката

Толщина проката, мм	Листовой прокат			Профильный прокат	
	Допустимое местное искривление, мм		Общее искривление на длине листа, мм	Допустимое местное искривление, мм	Общее искривление на длине полосы профиля, мм
	Листы, идущие на фотопроеctionальную разметку	Прочие листы			
1,5–3,5	3,0	4,0	10,0		
4,0–12,0	2,0	3,0	10,0	2,0	8,0
13,0 и более	2,0	2,0	10,0		

Весь выправленный листовый и профильный прокат перед его подачей на разметку и вырезку деталей подвергается очистке от окалины и ржавчины и последующей грунтовке или пассивированию, предохраняющим металл от коррозии в период изготовления судовых корпусных конструкций.

Все операции очистки, грунтовки и пассивирования металла выполняются при непрерывном перемещении металлопроката, что обеспечивается транспортной системой поточной линии (кантователи, роликовые и цепные конвейеры, перегружатели со специальными траверсами с магнитными захватами).

Наличие на поверхности металла ржавчины, окалины и следов нанесения грунта оказывает отрицательное влияние на качество поверхности реза при тепловой резке и в конечном итоге – на качество металла сварных швов.

6.3. ХАРАКТЕРИСТИКА И ТРЕБОВАНИЯ К ДЕТАЛЯМ КОРПУСА СУДНА, ИДУЩИМ НА СБОРКУ ПОД ДУГОВУЮ СВАРКУ КОНСТРУКЦИЙ

Стальной корпус морского судна состоит из десятков тысяч деталей различных габаритных размеров, форм и сложности, изготовленных из стального листового и профильного проката различного сортамента (полособульбового, таврового и др.) и соединенных между собой при помощи различных процессов дуговой сварки плавящимся электродом. Детали корпуса судна из листового проката бывают плоские и гнутые с вырезами внутри детали или по кромкам.

Кромки деталей, как правило, имеют фаски для обеспечения провара на всю толщину свариваемых деталей. Детали из профильного проката также бывают прямолинейные и гнутые с фасками под сварку по кромкам и торцам или без них. На рис. 6.2 в качестве примеров приведены эскизы плоских деталей из листового проката на типовой карте раскроя для тепловой вырезки с минимальными отходами металла и минимальными тепловыми деформациями, а на рис. 6.3 показаны примеры заготовок для различных видов гнутых деталей из листового проката.

При изготовлении деталей корпуса судна важно обеспечить предъявляемое к ним качество, которое оценивается по точности заданных размеров и форм, качеству поверхности и свойств материала детали. Под требованиями к точности размеров и форм понимается степень соответствия фактических размеров и форм деталей их параметрам, заданным соответствующими нормативными документами. А качество поверхности и свойства материала деталей устанавливаются в соответствующих стандартах, сертификатах и технических условиях.

В связи с тем, что качество сварных швов определяет надежность и работоспособность корпуса судна и соответственно судна в целом, оно зависит от качества деталей, подаваемых на сборку под сварку, то на форму, габаритные размеры деталей и отдельных конструктивных элементов деталей (особенно по кромкам) устанавливаются и контролируются допустимые отклонения. Соблюдение этих отклонений в сочетании с требованиями технологии сборки и сварки должно обеспечить необходимое качество сварных соединений.

В табл. 6.8 приведены допустимые отклонения габаритных размеров для машинной тепловой вырезки плоских деталей из листового проката. Детали корпуса судна, вырезаемые на машинах с ЧПУ, должны

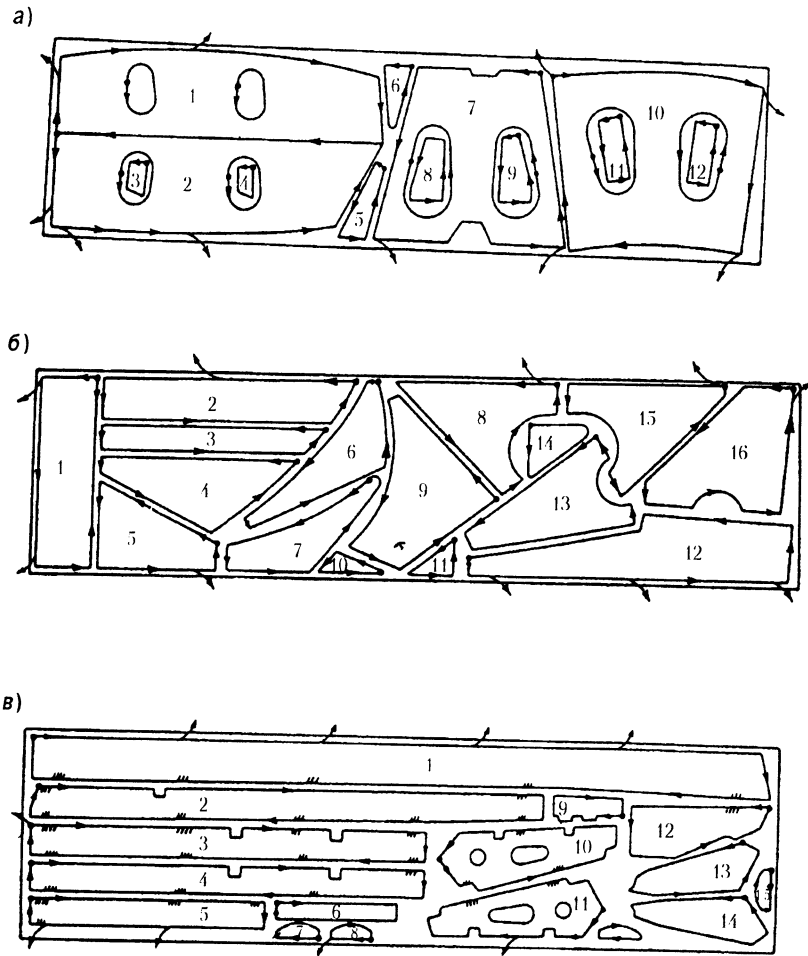


Рис. 6.2. Типовые плоские детали, размещенные на типовых картах раскроя листового проката, обеспечивающие минимальные тепловые деформации деталей и отходы металла при тепловой вырезке:

a – ширина деталей совпадает с шириной разрезаемого листа;
б – вырезка мелких деталей; *в* – вырезка длинных узких деталей;
 1–16 – номера деталей и очередность их вырезки

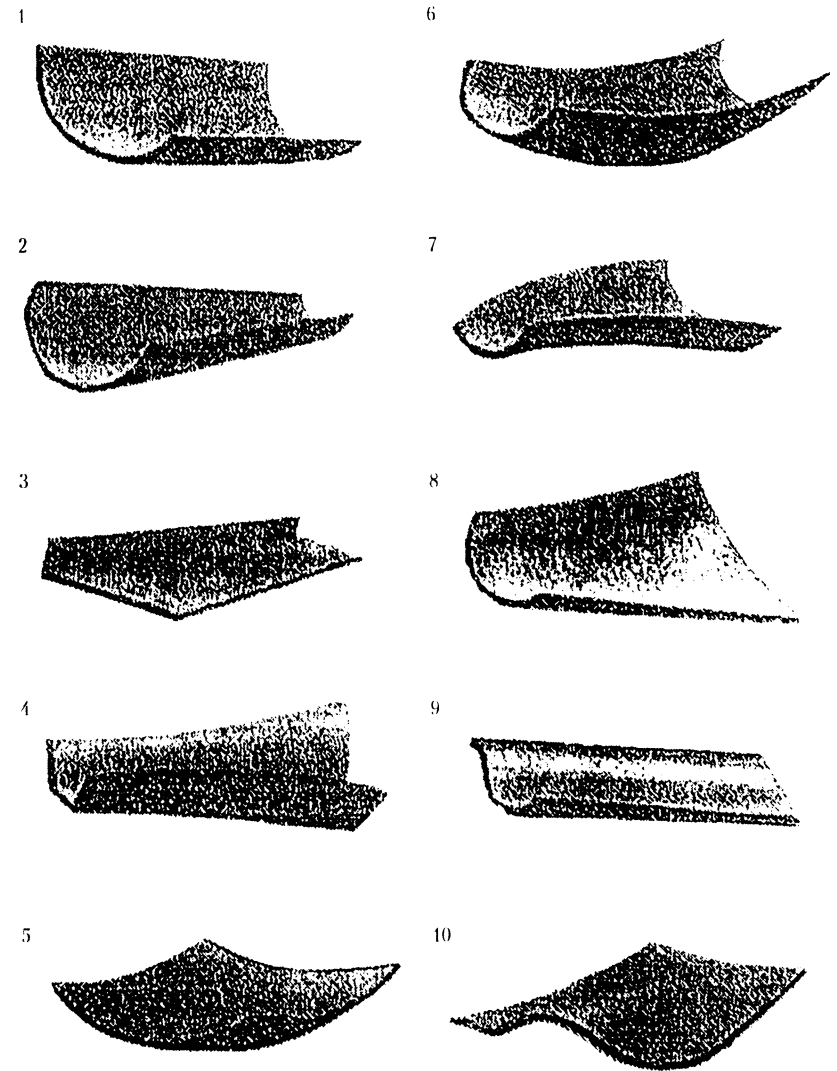


Рис. 6.3. Типовые представители гнутых листовых деталей различных форм:

1 – цилиндрической; 2 – конической; 3 – угловой; 4 – коробчатой; 5 – сферической;
 6 – парусовидной; 7 – седлообразной; 8 – вогнутой; 9 – волнообразной;
 10 – комбинированной

соответствовать 1-му классу точности, а на машинах других типов (стационарных и переносных) – 3-му классу точности. Детали международного пространства (флоры, стрингеры) должны соответствовать 2-му классу точности.

Таблица 6.8

Допустимые отклонения габаритных размеров плоских листовых деталей по ГОСТ 14792-80

Класс точности	Способ резки	Толщина листа, мм	Допустимые отклонения при номинальных размерах детали, мм			
			до 500	св. 500 до 1500	св. 1500 до 2500	св. 2500 до 5000
1	Кислородная и плазменная	5–30	±1,0	±1,5	±2,0	±2,5
		31–60	±1,0	±1,5	±2,0	±2,5
2	Кислородная	61–100	±1,5	±2,0	±2,5	±3,0
	Кислородная и плазменная	5–30	±2,0	±2,5	±3,0	±3,5
		31–60	±2,5	±3,0	±3,5	±4,0
Кислородная	61–100	±3,0	±3,5	±4,0	±4,5	
3	Кислородная и плазменная	5–30	±3,5	±3,5	±4,0	±4,5
		31–60	±4,0	±4,0	±4,5	±5,0
	Кислородная	61–100	±4,5	±4,5	±5,0	±5,0

Предельные отклонения вырезанных деталей от прямолинейности установлены в половинном размере от норм, указанных в табл. 6.8.

Допустимые отклонения от плоскости, габаритных размеров и форм плоских и гнутых листовых деталей приведены в табл. 6.9–6.12, в табл. 6.13 и 6.14 – допустимые отклонения для прямых и гнутых деталей из профильного проката. Допустимые отклонения размеров конструктивных элементов кромок деталей, вырезаемых тепловыми способами и подлежащих сварке в составе собранных конструкций, приведены в табл. 6.15. Указанные в таблицах значения допустимых отклонений на конструктивные параметры деталей являются жесткими для современных процессов изготовления деталей и могут быть обеспечены только при строгом соблюдении технологий и использовании исправного оборудования, особенно для деталей после вырезки и снятия фасок под сварку тепловыми способами.

Технология изготовления деталей корпуса судна включает в себя работы от плазмотехнологической подготовки производства, получения и складирования металла до выдачи готовых и комплектованных деталей (рис. 6.4). Процесс изготовления деталей

Таблица 6.9

Допустимые отклонения от плоскости листовых деталей после правки

Размеры деталей, мм	Допустимые отклонения
Длина: до 500 св. 500 до 1000 св. 1000 при толщине: от 3 до 6 св. 6 до 14 св. 14	1,0 мм на размер детали 1,5 мм на размер детали 2,5 мм на метр 2,0 мм на метр 1,5 мм на метр

Таблица 6.10

Допустимые отклонения от плоскости листовых деталей после правки

Типы деталей и их параметры	Номинальные размеры, мм	Допустимые отклонения, мм			Эскиз
		от габаритных размеров Δ	перекос $\Delta_1 = \Delta_A - \Delta_B$	от требуемой формы кромки Δ_2	
Детали с прямыми кромками	До 2000 Св. 2000 до 4500 Св. 4500	±1,5 ±2,0 ±2,5	1,0 1,5 1,5	±1,0 ±1,5 ±2,0	
Детали с криволинейными кромками	До 2000 Св. 2000 до 4500 Св. 4500	±2,0 ±2,5 ±3,0	1,0 1,5 1,5	±1,0 ±1,5 ±2,0	
Вырезы облегчения, срезы на углах деталей, голубницы и т. п.	–	±3,0	–	–	
Вырезы для набора: непроницаемые	–	±2,0	–	–	
Вырезы для набора: проницаемые	–	±2,0	–	–	
Положение вырезов для набора	–	±2,0	–	–	

Таблица 6.11

Допустимые отклонения формы гнутых листовых деталей

Форма детали	Сечение или элемент детали	Размер детали А, мм	Допустимые отклонения Δ при толщине, мм		Эскиз
			до 10	св. 10	
Цилиндрическая и коническая	Поперечное	До 1000	4	3	
		Св. 1000	5	4	
Парусовидная и седлообразная	Поперечное	До 1000	5	3	
		Св. 1000	6	4	
	Продольное	До 1000	3	2	
		Св. 1000 до 3500	5	4	
		Св. 3500 до 6000	7	5	
Св. 6000	10	8			
С перекосом	Поперечное	До 2000	5	4	
		Св. 2000	6	5	
	Продольное	До 1000	3	2	
		Св. 1000 до 3500	4	5	
		Св. 3500 до 6000	8	6	
Св. 6000	10	8			
Волнообразная и сложная	Поперечное	До 1000	4	3	
		Св. 1000 до 2000	5	4	
	Продольное	Св. 2000	6	5	
		До 1000	4	3	
		Св. 1000 до 3500	8	6	
Св. 3500 до 6000	10	8			
Св. 6000	12	10			
Со сломами	Отогнутая часть	До 2000	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$	
		До 100	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$	
	Положение отогнутой части	Св. 100	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$	
	Прямая часть	-	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$	

Таблица 6.12

Допустимые отклонения формы обечайки

Наименование	Обозначение отклонений	Допустимые отклонения формы обечайки, мм		Эскиз
		цилиндрической	конической	
Отклонения от шаблона по хорде 1500 мм	<i>a</i>	2,0	2,0	
Отклонения торцевых кромок от линий окружности, нанесенных на плите, радиуса				
меньшего	<i>b</i>	-	5,0	
Отклонения образующих на высоту 1000 мм	<i>c</i>	1,0	2,0	
Зазор между торцевой кромкой и проверочной плитой	<i>d</i>	1,0	1,0	
Отклонения периметра	<i>e</i>	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$	
Отклонения формы образующей на высоту обечайки 1000 мм	<i>g</i>	2,0	2,0	

Таблица 6.13

Допустимые отклонения для пустых деталей из профильного проката

Параметр	Допустимые отклонения
Длина детали, мм	±3,0
Плавная изогнутость, мм:	
на 1 п. м	2,0
на всю длину	8,0
Скручивание вокруг продольной оси, градус на метр	2,0
Отклонение от плоскости в поперечных сечениях, % от ширины полки	1,0
Гофры на стенках и полках, мм	2,0
Количество гофров:	
штук на метр	2,0
штук на всю длину	5,0

относится к корпусообработывающему виду производства, удельное значение которого составляет 5...8% от общей трудоемкости постройки корпуса судна и более 10% от численности работающих на верфи.

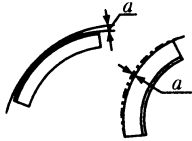
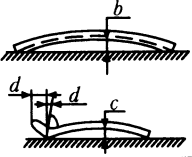
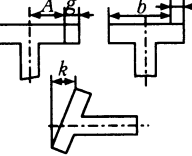
Значение корпусообработывающего производства определяется его решающим влиянием на возможность ритмичной работы корпусной группы цехов верфи и на трудоемкость работ при сборке узлов и секций корпуса судна, зависящей от точности формы и размеров изготавливаемых деталей, влияющей на объем пригоночных работ. Большая номенклатура материалов, применяемых для изготовления деталей корпуса судна, диапазон толщин металла (3,0...100,0 мм), различные формы, конфигурации и размеры деталей вызывают необходимость применения различных технологических процессов и оборудования для их обработки.

Изготовление деталей корпуса судна производится в корпусообработывающих цехах, в которых основные технологические операции и сопутствующие им вспомогательные (подъемно-транспортные) выполняются с использованием современных средств механизации и автоматизации. В состав цеха входят следующие производственные подразделения:

- *плаз*, включающий участки плазоворазметочных и вычислительных работ, фотолабораторию, участок изготовления шаблонов, копир-чертежей и т. п.;
- *склад стали*, располагаемый обычно на открытой площадке в непосредственной близости от цеха;

Таблица 6.14

Допустимые отклонения гнутых деталей из профильного проката

Отклонение	Обозначение отклонения	Допуск, мм	Эскиз
Отклонение от теоретической линии на плите или шаблоне: для наружных шпангоутов для внутренних шпангоутов	<i>a</i>	2,0	
	<i>a</i>	2,0	
Изгиб плоскости шпангоута	<i>b</i>	3,0	
Коробоватость стенки шпангоута	<i>c</i>	1,0	
Отклонение головки полосульба	<i>d</i>	3,0	
Волнистость кромки шпангоута	<i>e</i>	2,0	
Асимметрия полки тавра	<i>g</i>	±1,5	
Ширина полки тавра	<i>i</i>	±2,0	
Неперпендикулярность полки и стенки тавра	<i>k</i>	±2,0	
Утонение стенки	—	1,0	
Изменение высоты профиля	—	±2,0	
Уменьшение высоты бульба или полки	—	2,0	
Отклонение от малки при высоте стенки:	—		
до 150 мм	—	±1,5	
более 150 мм	—	±3,0	
Скручивание на всю длину	—	3	
Вмятины	—	1,0	

- *участок предварительных операций*, расположенный в здании цеха или в отдельном здании и предназначенный для правки, очистки и грунтовки стального проката;
- *участки обработки проката*, состоящие из механизированных и частично автоматизированных поточных линий тепловой и механической вырезки деталей из листового и профильного проката, участков гибки заготовок деталей и комплектации. Качество предварительной обработки металлопроката и качество изготовленных деталей определяют качество и трудоемкость последующей сборки и сварки конструкций.

Таблица 6.15

Допустимые отклонения размеров конструктивных элементов деталей после их тепловой вырезки

Наименование отклонений элементов детали	Предельное значение, мм	Примеры отклонения
1. Отклонение от заданной формы на углах листовых деталей: при газовой резке при плазменной резке	$m = -1$ $m = -2$	
2. Отклонение поверхности реза от номинальной: при машинной кислородной и плазменной резке при толщине металла, мм: от 5 до 15 вкл. св. 15 » 30 » » 30 » 50 »	$\Delta = 1,0$ $\Delta = 1,2$ $\Delta = 1,6$	 1 — поверхность резаемого металла. 2 — номинальная поверхность реза, 3 — реальная поверхность реза
при ручной кислородной резке и толщине металла, мм: от 5 до 15 вкл. св. 15 » 30 » » 30 » 50 »	$\Delta = 1,2$ $\Delta = 1,6$ $\Delta = 2,0$	
при ручной плазменной резке и толщине металла, мм: от 5 до 15 вкл. св. 15 » 30 » » 30 » 50 »	$\Delta = 2,3$ $\Delta = 3,0$ $\Delta = 4,0$	
3. Отклонение от величины угла α скоса кромки под сварку, град*	$\Delta\alpha = \pm 3^\circ$	
4. Смещение притупления h , мм	$\Delta h = \pm 3$	
5. Отклонение от размера притупления t , мм	$\Delta t = \pm 1$	
6. Отклонение от глубины ласки h и длины l , мм **: а) при любом значении h б) при h от 3 до 5 вкл. при h св. 5 до 10 вкл. при h св. 10 до 20 вкл.	$\Delta h = \pm 2$ $\Delta h = \pm 6$ $\Delta h = \pm 10$ $\Delta h = \pm 20$	
7. Отклонение поверхности ласки f от номинальной при глубине ласки h , мм: от 3 до 5 вкл. св. 5 » 10 » » 10 » 50 »	$f = \pm 1$ $f = \pm 2$ $f = \pm 3$	

Окончание табл. 6.15

Наименование отклонений элементов детали	Предельное значение, мм	Примеры отклонения
8. Скругление верхней кромки поверхности реза r при толщине металла, мм: от 5 до 15 вкл. св. 15 » 30 » » 30 » 50 » » 50 » 100 »	$r = 1,5$ $r = 2,0$ $r = 2,5$ $r = 3,0$	

* Допускаемые значения отклонений от величины угла α определяются нормативами на сварку: ГОСТ 5264-69; 14771-79; 8713-79 и др.

** Резкие изменения длины ласки не допускаются. Участок плавного изменения длины ласки на любой детали должен быть не менее 500 мм.

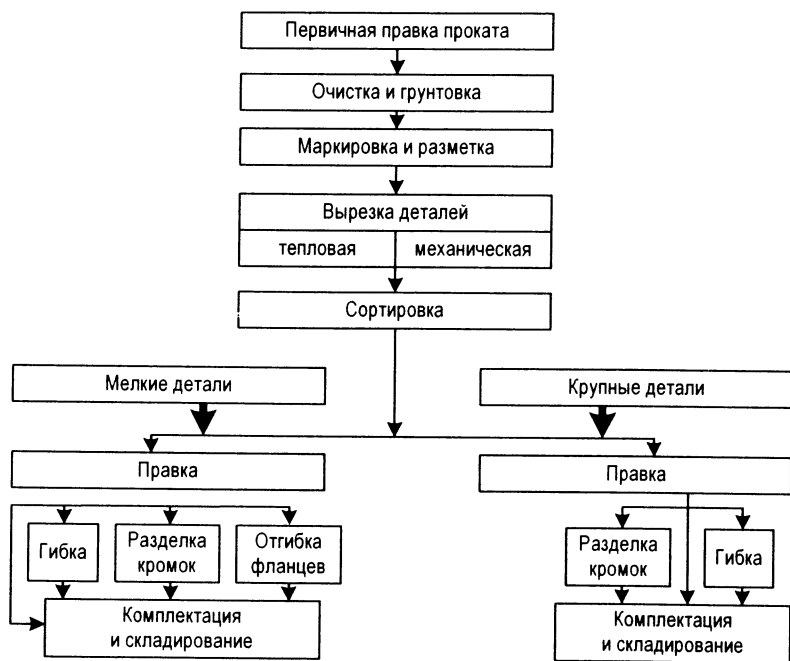
6.4. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ КОРПУСА СУДА

Тепловая резка. Одной из основных технологических операций изготовления деталей является тепловая резка, которая предназначена для вырезки деталей любой геометрической формы и размеров при толщине металла от 4,0 мм и более.

Под тепловой резкой понимается технологический процесс разделения металла при помощи тепла. В зависимости от видов источников тепла различают следующие виды тепловой резки: дуговая (тепло электрической дуги), кислородная (тепло экзотермических реакций горения резаемого металла и горючего газа), плазменная (тепло плазменной дуги) и лазерная (тепло луча лазерного излучения). Указанные виды тепловой резки существенно отличаются между собой по тепловым характеристикам и качеству вырезанных деталей, по возможности механизации и автоматизации процесса резки и поэтому имеют различные области применения при обработке металлических материалов.

По характеру образуемых резов тепловую резку подразделяют на разделительную (образующую сквозные резы, отделяющие одну часть металла от другой) для получения заданных контуров деталей и поверхностную резку, называемую тепловой строжкой, при которой удаляется поверхностный слой металла в виде канавки полукруглого сечения для подготовки V-образных кромок под сварку в монтажных условиях, при ремонте сварных швов с дефектами и т. п.

а)



б)

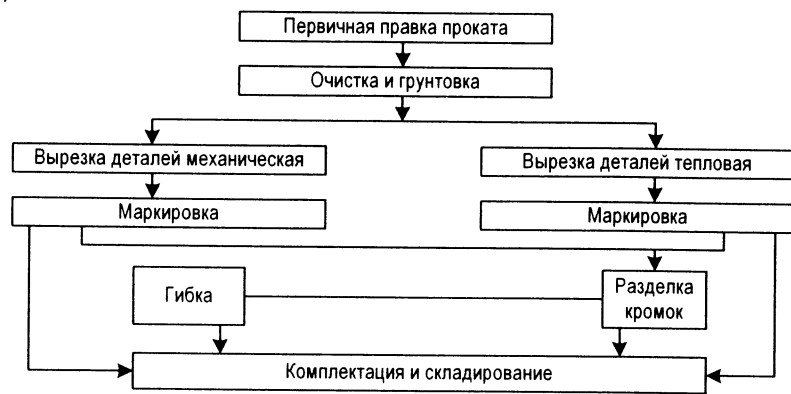


Рис. 6.4. Типовые технологические операции изготовления деталей корпуса судна и последовательность их выполнения для деталей из листового (а) и профильного (б) проката

Разделительная резка выполняется на стационарных и переносных машинах и вручную в составе поточных линий. Вырезка деталей с криволинейными кромками производится, как правило, на стационарных машинах. Ручную резку применяют при вырезке деталей из профильного проката, разрезке перемычек, отходов и др.

Дуговая резка выполняется, как правило, с применением плавящегося или неплавящегося электродов. Она характеризуется низким качеством кромок вырезанных деталей, низкой скоростью резки, неудовлетворительными экологическими условиями, трудно поддается механизации и поэтому не используется при изготовлении деталей корпуса судна. При изготовлении деталей корпуса судна применяют плазменную и кислородную резку.

Основной объем тепловой резки приходится на плазменную резку в связи с более высокими скоростями резки листов проката толщиной 4,0...30,0 мм (по сравнению с кислородной резкой) и существенно меньшими остаточными тепловыми деформациями вырезаемых деталей.

Кислородная резка более эффективна при вырезке деталей из низколегированных и низкоуглеродистых сталей толщиной более 30,0 мм. Она также является единственным тепловым процессом вырезки деталей из высокопрочных сталей и титановых сплавов, снятия фасок на вырезанных деталях, а также вырезки деталей с одновременным снятием фасок под сварку.

Перспективным является процесс лазерной резки, особенно при обработке тонколистового проката (толщиной менее 4,0 мм).

Наиболее высокая точность вырезаемых деталей достигается при плазменной резке на стационарных машинах с ЧПУ, а также при лазерной резке. Они работают в составе комплексно-механизированных поточных линий, оснащенных подъемно-транспортными средствами, раскроечными рамами, межоперационными накопителями и перегружателями.

Кислородная резка. Кислородная резка является химическим процессом. Она основана на интенсивном окислении (горении) металла в кислороде, сопровождающемся выделением большого количества тепла в результате экзотермических реакций, сосредоточенного на узком участке. В результате перемещения участков горения металла и удаления из разреза продуктов окисления образуется непрерывная линия разделения (реза) монолитного металла. Процесс резки металла происходит в основном за счет тепла реакций горения металла. Тепло подогревающего пламени необходимо для подогрева металла до температуры его воспламенения и поддержания процесса горения металла.

Разрезаемость металлов в кислороде зависит от их химической активности с кислородом, теплофизических характеристик и химического состава. По этой причине кислородную резку не применяют для вырезки деталей из высокоуглеродистых и аустенитных сталей, чугуна, алюминия, меди и их сплавов и др.

Качество вырезаемых деталей и эффективность кислородной резки зависят от режимов резки и качества подготовки металла (наличия окалины, ржавчины, грунта, качества правки и др.).

При кислородной резке стального проката толщиной менее 10 мм на нижней кромке вырезаемых деталей задерживается шлак (грат), содержащий большое количество неокисленного железа. Такой грат является недопустимым на деталях и подлежит удалению при помощи механической рубки или обработки наждачным кругом. Обеспечить безгратовую вырезку таких деталей можно за счет повышения чистоты кислорода или снижения скорости резки, уменьшения мощности подогревающего пламени. При резке тонколистовой стали доля тепла, поступающего в металл от подогревающего пламени, больше доли тепла от реакций горения металла.

В результате этого происходит значительный перегрев металла и оплавление верхних кромок реза и коробление детали, что не удовлетворяет требованиям к качеству вырезаемых деталей. Поэтому кислородная вырезка деталей из металла толщиной менее 4,0 мм не рекомендуется. При вырезке деталей из металла толщиной 4,0...5,0 мм следует применять кислород чистотой не ниже 99,5% при его давлении не более 0,3 МПа, назначать минимальную тепловую мощность подогревающего пламени при максимально возможной скорости его перемещения.

Кислородная резка стального профильного проката выполняется по разметке на переносных машинах или ручными резаками; в отдельных случаях используются специализированные установки. Основные положения технологии кислородной вырезки деталей и профильного проката не имеют принципиальных отличий от технологии вырезки из листового проката соответствующих толщин.

Значительное количество деталей, предназначенных для изготовления сварных конструкций, имеют скос кромок под сварку. Кромки деталей под сварку имеют скос кромок с одной стороны (V-образные) или с двух сторон (X-образные) с притуплением и без него. Технология вырезки деталей с фасками с помощью тепловой резки предусматривает, как правило, вырезку деталей вертикальным резаком на стационарной машине кислородным или плазменным способом с обеспечением заданных форм и размеров плоской детали. После чего

происходит снятие фасок наклонным кислородным резаком без кантовки детали (при V- и X-образной разделке) или с кантовкой (при X-образной разделке) по разметке на переносной машине или вручную. Принципиально возможна тепловая вырезка деталей по контуру с одновременным снятием фасок под сварку на стационарных машинах, оснащенных трехрезовым блоком: один вертикальный центральный резак, обеспечивающий заданные габаритные размеры и форму детали, и два наклонных (боковых) резака, настраиваемых на угол наклона, соответствующий углу разделки кромок детали.

При вырезке деталей с криволинейными очертаниями предусматривается возможность поворота блока резаков вокруг вертикальной оси центрального резака, а также смещение (разнесение) боковых резаков относительно центрального на расстояние до 15 мм по направлению линии реза и перпендикулярно к ней. В этом случае только вертикальный резак перемещается по траектории, соответствующей заданным размерам и контуру вырезаемой детали, а наклонные (боковые) резаки, находящиеся на некотором удалении от вертикального резака, описывают траектории, отличные от необходимых. Это приводит к погрешностям в размерах и чистоте фасок, которые тем больше, чем меньше радиус кривизны контура детали, а при радиусе менее 200 мм погрешности настолько велики, что вырезаемые детали не удовлетворяют заданным требованиям. Кроме того, при тепловой вырезке деталей с одновременным снятием фасок под сварку происходит уменьшение коэффициента использования металла за счет снятия боковым (наклонным) резаком рядом расположенного металла, что приводит к необходимости размещать детали на большем расстоянии друг от друга, в результате чего возрастают отходы металла. По указанным и некоторым другим причинам технология вырезки деталей с одновременным снятием фасок под сварку практического применения не находит.

Для этих целей применяется технология, предусматривающая вырезку деталей плазменным или кислородным способами с последующим снятием фасок с одной или с двух сторон механическим способом путем скалывания на специальном станке (для небольших деталей) или кислородной резкой наклонными резаками (одним или двумя), копирующими контур детали, на стационарной машине типа «Ладоба» (при вырезке средних и крупных деталей).

Плазменная резка. Процесс плазменной резки металлов основан на его расплавлении на всю толщину теплом плазменной дуги и удалении из зоны резки расплавленного металла. Однако, если производится резка металлов, обладающих большим сродством с кислородом, то

одновременно имеет место и химический процесс, связанный с интенсивным окислением металла (горением) в кислороде, который содержится в плазмообразующем газе или в окружающем воздухе.

Плазменная дуга образуется в плазмотроне, через сопло которого пропускается (сжимается) вместе с плазмообразующим газом столб электрической дуги, горящей между электродом и обрабатываемым металлом. Под воздействием стенок канала сопла и струи плазмообразующего газа, подаваемого под определенным давлением, столб дуги сжимается, его поперечное сечение уменьшается, а температура в центре плазменной дуги в зависимости от степени обжаривания, величины электрического тока, состава и расхода газа возрастает до 10000...30000 К. Напряжение дуги составляет 60...200 В, плотность тока доходит до 100 А/мм², а удельная тепловая мощность достигает 2·10⁶ Вт/см². Такие характеристики плазменной дуги позволяют расплавить любой металл и осуществить с большой скоростью его резку, что свидетельствует об универсальности процесса.

Для плазменной резки в качестве плазмообразующей среды используют различные газы: воздух, кислород, азот, аргон и др., а также смеси различных газов и газов с водой.

Режим плазменной резки оказывает большое влияние на качество вырезаемых деталей и эффективность процесса резки. К основным параметрам режимов плазменной резки относятся: напряжение дуги, сила тока, диаметр сопла плазмотрона, состав и расход плазмообразующего газа и скорость резки.

Плазменная резка выполняется на постоянном токе прямой полярности (минус на электроде). Напряжение на дуге зависит от характеристик источника питания, конструкции плазмотрона, диаметра сопла, вида плазмообразующей среды, толщины и марки разрезаемого металла. Плотность тока, которую выдерживает сопло, не разрушаясь, является показателем степени совершенства конструкции плазмотрона. На значение плотности тока оказывают основное влияние диаметр отверстия сопла плазмотрона и сила тока.

На характер процесса резки и качество поверхности реза существенно влияет скорость плазменной резки, с увеличением которой анодное пятно (контактная область дуги на аноде) перемещается к верхней кромке разреза по его фронту. Факел плазмы, выходящий из разреза, отклоняется в сторону, противоположную направлению резки. Ширина реза при максимальной скорости резки по нижней плоскости листа из малоуглеродистой и низколегированной стали толщиной 6,0...30,0 мм составляет 1,5...3,0 мм. Увеличение скорости резки выше ее предельного значения приводит к непрорезанию листа.

В верхней части разреза ширина его зависит от диаметра сопла, силы тока, скорости резки, вида и расхода плазмообразующего газа, расстояния сопла плазмотрона от поверхности разрезаемого листа. Ширину реза у верхней поверхности листа принимают ориентировочно равной двум значениям диаметра сопла. Это свидетельствует о том, что при резке плазмотроном с соплом диаметром 2,0...3,0 мм поверхность реза не перпендикулярна поверхности разрезаемого листа, т. е. поверхность кромки реза имеет скос около 1,0...2,0 мм. Чаще всего скос кромок реза меньше на правой поверхности реза по ходу резки при резке плазмотроном с вихревой стабилизацией дуги с завихрителем, канавки которого направлены по часовой стрелке.

При небольших скоростях резки анодное пятно перемещается в нижнюю часть разреза, ширина которого здесь значительно возрастает, факел плазмы на выходе отклоняется вперед по ходу резки. Резка на небольших скоростях способствует образованию прочно сцепленных с металлом нижней кромки реза наплывов грата. При оптимальных скоростях резки на кромках реза грат отсутствует. При небольших скоростях резки факел плазмы выходит из разреза вертикально, а увеличение скорости резки отклоняет факел в сторону, противоположную направлению резки. При правильно выбранной скорости резки передняя граница факела близка к вертикальному положению.

Плазменная резка в широком диапазоне толщин разрезаемого металла (4,0...30,0 мм) выполняется при постоянной нагрузке источника питания и расходе плазмообразующей среды, а изменяется только скорость резки в зависимости от толщины разрезаемого металла.

Представляет интерес использование воды при плазменной резке. Вода может использоваться в качестве плазмообразующей среды (водоплазменная резка), подаваться в небольшом количестве в столб плазменной дуги (воздушно-водяная или кислородно-водяная плазменная резка), в воду также погружается при обычной газоплазменной резке разрезаемый металл.

Стабилизация водоплазменной резки обеспечивается завихрением воды с помощью канала, ограниченного двумя соплами. При этом обеспечивается хорошее качество поверхности реза и высокая производительность резки, особенно при резке цветных металлов и высоколегированных сталей большой толщины. Поверхность реза имеет незначительный скос кромок и блеск естественного цвета металла. Однако водоплазменная резка имеет серьезные недостатки: сложность возбуждения дуги в начале резки и применение графитового электрода.

Плазменная резка с подачей небольшого количества воды через плазмотрон в воздушно-плазменную или кислородно-плазменную

дугу находит применение при вырезке деталей из малоуглеродистых и низколегированных сталей. Достоинством этой резки являются улучшение качества поверхности реза, уменьшение скоса кромок, уменьшение насыщения металла азотом и тепловых деформаций вырезаемых деталей.

Плазменная резка металла, погруженного в воду, отличается от обычной газоплазменной резки в атмосфере тем, что разрезаемый металл устанавливается над поверхностью воды и затем частично или полностью в нее погружается на период его резки. При такой резке расплавленный металл и шлак, образующиеся при резке, полностью оседают в воде, и вредные для здоровья человека пыль и газы не попадают в атмосферу. При этом уменьшаются тепловые деформации вырезаемых деталей, улучшается качество поверхности и снижается шум, характерный для плазменной резки. Однако при таком процессе резки происходит некоторое уменьшение производительности резки, а также необходимо применение специальных водонепроницаемых раскройных рам и специальных емкостей для слива в них использованной воды.

Основным достоинством плазменной вырезки деталей для корпусов судов из низкоуглеродистых и низколегированных сталей по сравнению с кислородной резкой являются более высокая скорость резки и точность вырезаемых деталей за счет существенно меньших остаточных тепловых деформаций и др. К недостаткам плазменной вырезки деталей корпуса судна относятся неперпендикулярность поверхности реза и вырезаемой детали (скос кромок), открытая плазменная дуга, большое газовыделение, которое требует применения специальных мер по защите работающих в зоне резки, сравнительно небольшая во времени стойкость катода и сопла плазмотрона. И, главное, при резке судокорпусных сталей толщиной менее 8,0 мм происходит значительное насыщение металла у поверхности реза азотом, приводящее к образованию недопустимых пор в швах при автоматической сварке под флюсом.

Содержание азота в металле у поверхности реза (на глубине до 0,02 мм) при воздушно-плазменной резке в сотни раз превосходит его начальное содержание в основном металле (рис. 6.5). Поэтому плазменная вырезка деталей из металла толщиной менее 8,0 мм под автоматическую сварку под флюсом не рекомендуется. Известно много путей уменьшения насыщения азотом металла кромок деталей при их плазменной вырезке, но во всех случаях не удается снизить его содержание до значений как в основном металле. При резке стали толщиной 9,0 и 16,0 мм током 300 А при напряжении 140...150 В и соответственно со

скоростями резки 2,5 и 1,3 м/мин в металле кромок реза содержалось азота соответственно 2,68% и 0,7%.

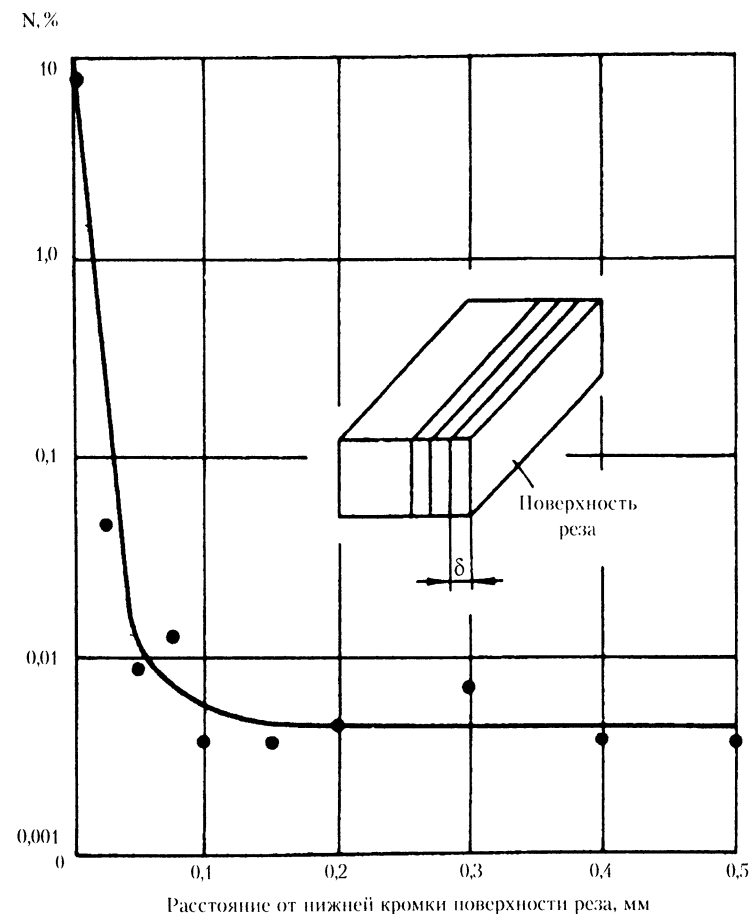


Рис. 6.5. Распределение азота в глубину кромки от поверхности реза (плазмообразующий газ – воздух, сталь ВСтЗсп толщиной 9 мм)

Лазерная резка. В качестве источника тепла при этом способе резки используются когерентные пучки монохроматического света, получаемые в специальных установках, называемых оптическими квантовыми генераторами (ОКГ) или лазерами. Такие пучки света характеризуются небольшой расходимостью и высокой интенсивностью

излучения, что обеспечивает большую плотность энергии света на весьма малой площади. Высокая удельная плотность (плотность мощности) позволяет расплавить или испарить на этом участке практически любой материал. Это и обуславливает большой интерес к лазерам, прежде всего для таких технологических процессов как тепловая резка, сварка, разметка, маркирование и др. Принципиально лазерная резка возможна за счет испарения материала, за счет плавления металла и удаления расплава из зоны реза, за счет некоторых химических реакций горения или разложения с выделением летучих соединений и др.

Для резки металлических материалов целесообразно применение лазерного излучения непрерывного или импульсно-периодического действия с поддувом газа для удаления расплавленного металла. Такой процесс назван газолазерной резкой. При газолазерной резке металлов в зависимости от режима облучения и свойств металла различают химический и физический механизмы разрушения материала.

Для химического механизма характерен существенный вклад теплоты реакции горения металла в общий тепловой баланс. Этот механизм резки наблюдается при обработке металлов, подверженных воспламенению и горению при температурах ниже их температур плавления и образующих жидкотекучие окислы. К таким материалам относятся низкоуглеродистые и низколегированные стали, титан и его сплавы.

При физическом механизме резки материала не происходит его горения. Металл плавится, и струя газа своим давлением удаляет расплавленный металл из зоны реза. Такой механизм резки характерен для металлов и сплавов, при резке которых выделяется недостаточное количество теплоты от экзотермических реакций горения металла, и у которых при взаимодействии с кислородом образуются тугоплавкие окислы. К таким металлам относятся медь, алюминий и их сплавы, нержавеющие аустенитные стали и др.

Привлекательными чертами газолазерной резки являются универсальность процесса с точки зрения возможности резки любых металлических и неметаллических материалов, незначительные остаточные тепловые деформации и др. Эти особенности обуславливают большой интерес к газолазерной резке металлов. Вместе с тем оборудование для этого процесса характеризуется высокими стоимостью, сложностью, материалоемкостью и энергоемкостью. А небольшая тепловая мощность современных лазеров для технологических целей существенно ограничивает области применения газолазерной резки. Сведения, приводимые в литературе о промышленном использовании газолазерной резки металлических материалов, крайне ограничены и относятся

только к тонколистовому металлопрокату. В отечественном судостроении разработана технология вырезки деталей из листового проката толщиной до 5,0 мм и созданы для этих целей стационарные машины с ЧПУ. Однако по ряду причин (технических, организационных, экономических) указанная технология резки пока не нашла широкого применения в судостроении.

Механическая резка. Механическая резка применяется для вырезки деталей с прямыми и криволинейными кромками из листового стального проката толщиной до 4,0 мм, для обработки которых тепловые способы резки не обеспечивают необходимое качество кромок деталей. Также она применяется для вырезки деталей с прямолинейными кромками из листового проката толщиной до 12,0 мм и для вырезки деталей из профильного проката. По сравнению с тепловой резкой механическая резка проходит на существенно более высоких скоростях. Однако она сопряжена с использованием тяжелого ручного труда, затруднена ее механизация и автоматизация, а при вырезке узких полос они приобретают винтообразную деформацию, трудноподдающуюся правке. Точность вырезанных деталей зависит от качества настройки и заточки ножей, от точности разметки, от наведения линии реза под ножи и квалификации рабочих, выполняющих резку.

Процесс механической резки сопровождается сложной деформацией металла, характеризуемой изгибом и разрывом волокон в процессе среза (скалывания) на всю толщину металла. Они вызваны концентрированными нагрузками под действием специальных видов оборудования. На поверхности кромки металла выделяются две зоны: узкая, блестящая полоска, соответствующая пластической стадии деформирования, и более широкая матовая зона скалывания. Металл в зоне реза в результате наклепа упрочняется с одновременным понижением пластичности и ударной вязкости. На поверхности реза образуются микротрещины. Поэтому во многих случаях эта зона удаляется последующей строжкой или фрезерованием металла.

Гибка заготовок деталей. Большое количество деталей, изготавливаемых из листового и профильного проката, подвергается гибке.

Гибка выполняется преимущественно в холодном состоянии. Горячая гибка применяется в тех случаях, когда необходимо получить детали с радиусом кривизны менее предельно допустимого при холодной гибке или когда не удается получить при холодной гибке необходимую сложную форму.

Большое разнообразие размеров и сложных форм деталей приводит к необходимости использовать различные технологические приемы

гибки, оборудование и оснастку, занимать рабочих высокой квалификации.

Основными способами гибки заготовок деталей являются гибка поперечным изгибом (свободная) и в упор (гибка-штамповка), выполняемые на валковых листогибочных машинах, на гидравлических и механических прессах и др. Все виды гибки являются достаточно сложными и трудоемкими (особенно вспомогательные работы) и связаны с использованием в большом объеме тяжелого ручного труда.

Контроль качества деталей. Для обеспечения необходимого качества готовых деталей осуществляется их пооперационный контроль и периодическая проверка точности работы соответствующего технологического оборудования. Для оценки качества готовых деталей до их сборки проводится внешний осмотр, которым оценивается правильность формы детали и ее кромок: качество обработки свариваемых кромок и поверхностей, прилегающих к ним (отсутствие на них трещин, черновин, выхватов и т. п.), чистота свариваемых кромок и поверхностей, прилегающих к ним (отсутствие на них загрязнений, ржавчины, краски, масла и т. п.).

После оценки качества деталей внешним осмотром или одновременно с ним производится контроль измерением угла разделки кромок, глубины разделки кромок, размера притупления кромок, положения вершины разделки, размера и положения наплавляемого притупления на кромке детали и т. п.

Габаритные размеры деталей контролируются измерительным инструментом или специальным шаблоном, прямолинейность кромок длиной до 2000 мм – при помощи стальной линейки, более 2000 мм – при помощи натяжения тонкой нити вдоль измеряемой кромки и замера расстояний от нее до кромки через каждые 500 мм.

Отклонение углов разделки кромок под сварку проверяется угломером или шаблоном. Отклонение от плоскости проверяется при помощи линейки и щупа. Проверка кривизны деталей цилиндрической формы выполняется при помощи шаблона не менее чем по трем сечениям – вблизи нижней и верхней кромок и посередине; деталей конической формы – при помощи шаблонов не менее чем в двух крайних сечениях.

Контроль деталей с перекосом и парусовидной формы производится при помощи поперечных и продольных шаблонов или каркаса. Детали волнообразной и других сложных форм контролируются при помощи каркасов.

6.5. ХАРАКТЕРИСТИКА СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ИХ СОЕДИНЕНИЯМ ПОД СВАРКУ

Применение электродуговой сварки при соединении металлоконструкций взамен горячей и холодной клепки начато в 30-х годах XX столетия. Это позволило отказаться от подетального метода сборки корпусов судов на стапеле и перейти к их изготовлению из отдельных частей, предварительно изготовленных в сборочно-сварочном цехе.

Обычно металлический корпус судна собирается из блоков-секций, секций, узлов и отдельных деталей. Самой простой частью корпуса судна после детали является *узел* (рис. 6.6), под которым понимается технологически законченная часть корпусной конструкции, состоящая из нескольких деталей.

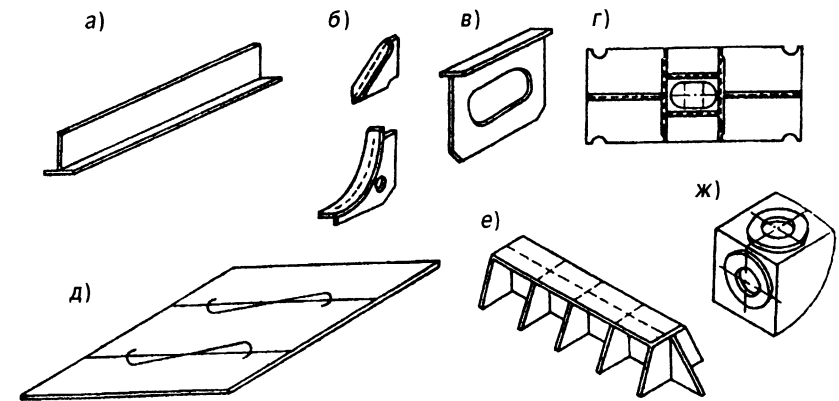


Рис. 6.6. Примеры конструкций узлов корпуса судна:

- a* – балка таврового сечения; *б* – кницы с прямолинейными и криволинейными поясками; *в* – бракетты с вырезом и пояском; *г* – широкая полоса с ребрами;
- д* – подотинице из трех листов; *е* – объемный узел фундамента;
- ж* – объемный узел – кингстонная коробка

Корпусные конструкции, из которых в основном формируется корпус судна, состоящие из ряда узлов и отдельных деталей и включающие обычно некоторые детали оборудования, устройств и другого насыщения, представляют собой технологически законченную часть корпуса судна и называются *секциями* (рис. 6.7).

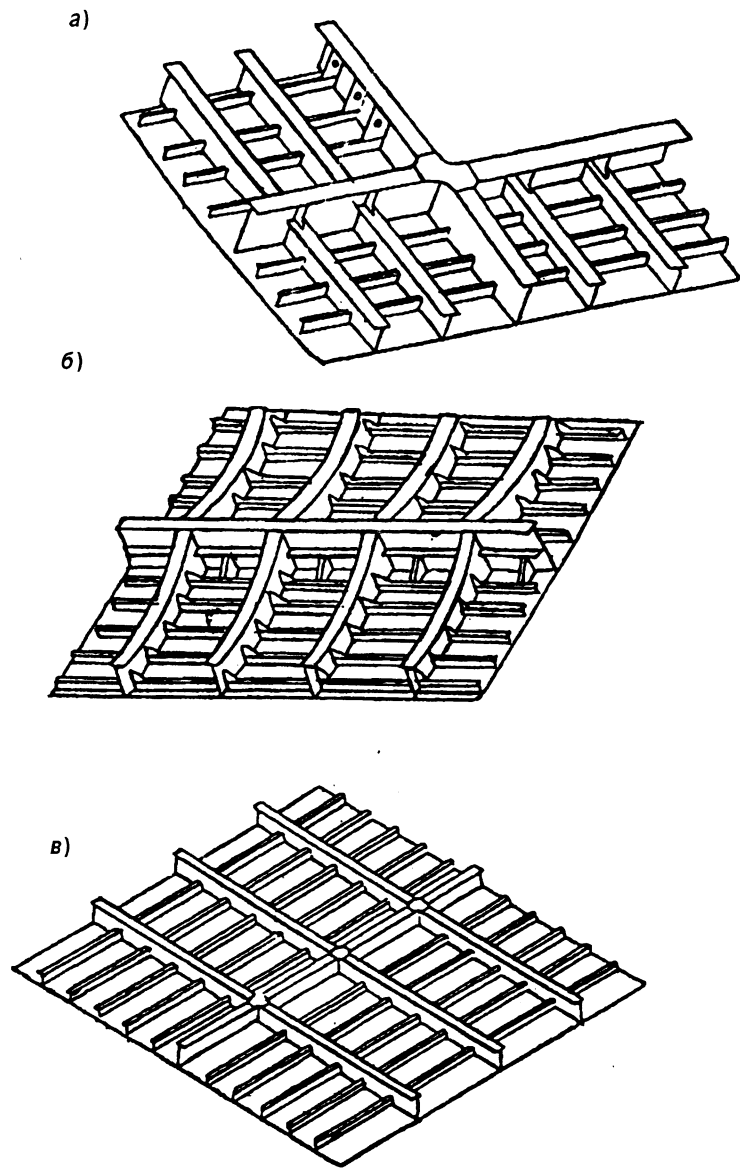


Рис. 6.7. Типовые секции корпуса судна:
a – палубная; *б* – днищевая; *в* – бортовая

Соответственно форме корпуса судна секции бывают плоские и объемные (полуобъемные), а по месту их положения на корпусе – бортовые, днищевые и др. Часть корпуса судна, отсеченная плоскостями, параллельными мидель-шпангоуту, а иногда и палубам, и отдельно формируемая из секций, узлов и деталей, называется блоком-секцией (рис. 6.8). Блок-секцию с установленными в нем (полностью или частично) элементами систем, устройств, механизмов, электрооборудования, отделки помещений и другого оборудования называют *блоком судна* или просто *блоком*.

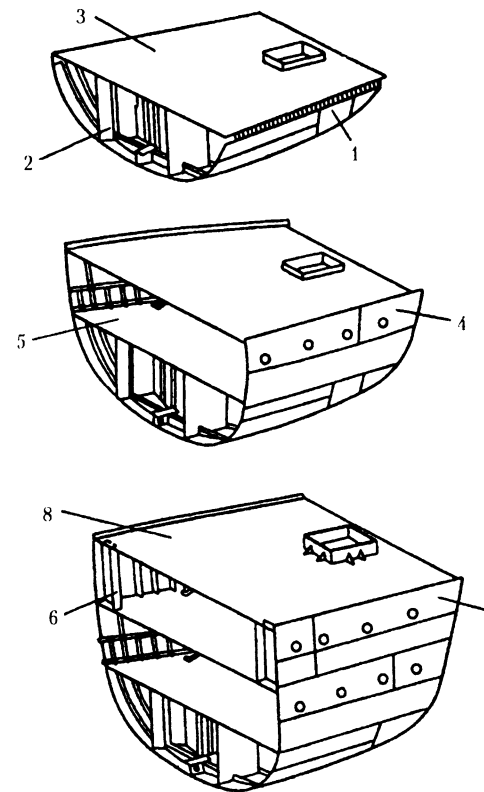


Рис. 6.8. Схема последовательности формирования блока-секции пассажирского судна:

1 – днищевая секция; 2 – продольная переборка; 3 – платформа; 4 – бортовая секция;
 5 – секция нижней палубы; 6 – внутренние выгородки; 7 – верхняя бортовая секция;
 8 – секция верхней палубы

Характерной особенностью судовых корпусных конструкций является наличие в них плоских и криволинейных поверхностей, на которых располагаются различные виды соединений, подлежащих сварке. Эта особенность создает различные возможности сборки соединений и последующей их сварки, так как предопределяет необходимость выполнения работ, прежде всего сварки, как в нижнем (наиболее удобном), так и в других положениях в пространстве. Применяемые конкретные конструктивные характеристики соединений зависят также от применяемых процессов сварки. При изготовлении судовых корпусных конструкций преимущественно (более 97%) используются дуговые процессы сварки плавящимся электродом. Причем различные виды дуговой сварки характеризуются различными технологическими данными как по возможностям выполнения сварки во всех положениях в пространстве, так и по глубине проплавленного металла, предопределяющей требования к кромкам деталей при их изготовлении.

Например, способы сварки под флюсом позволяют производить сварку соединений больших толщин с полным проваром по самым простым кромкам (без их разделки). Но этот процесс не применим для сварки соединений в положениях, отличных от нижнего. С другой стороны, ручная сварка покрытыми электродами и сварка в защитном газе плавящимся электродом характеризуются небольшой глубиной проплавления, и, следовательно, для проплавления металла на всю толщину практически всех толщин необходимо производить разделку кромок. Но при этих процессах имеется возможность вести сварку соединений во всех положениях в пространстве.

В зависимости от вида притыкания собираемых деталей друг к другу (кромка одной детали с кромкой другой детали или кромка одной детали с поверхностью другой детали) соединения деталей подразделяются на стыковые, тавровые, угловые и нахлесточные.

Стыковое соединение образуется путем притыкания кромки двух деталей одинаковой или различной толщины. Толщина металла детали неограничена. Если соединяют детали различной толщины, то на более толстой из них делается скос с одной или двух сторон до толщины, равной толщине второй детали. Разновидностью стыкового соединения является соединение с отбортовкой кромок, применяемое для деталей толщиной менее 3,0 мм.

Тавровое соединение получается путем притыкания кромки одной детали (стенки) к поверхности второй детали (полки). Такое соединение может состоять из деталей как одинаковой, так и различной толщины.

Угловое соединение получается путем притыкания под прямым, острым или тупым углом кромки одной детали с кромкой второй детали или кромки одной детали с поверхностью у кромки второй детали.

Нахлесточное соединение получается путем притыкания плоскостями двух соединяемых деталей.

Стыковое соединение в наибольшей степени соответствует специфике сварки и обеспечивает оптимальные условия передачи усилий от одной детали к другой в составе сварной конструкции. При нахлесточном соединении создаются неблагоприятные условия для передачи усилий, так как в результате наложенности приложения нагрузки возникает изгибающий момент, при этом увеличивается расход металла и длина сварных швов характеризуется низким пределом выносливости. Но к точности соединяемых деталей предъявляются более низкие требования.

В корпусах судов наибольшее применение находят тавровые и стыковые соединения, и только в неотчетливых узлах конструкций ограничительно применяются нахлесточные соединения. Сочетание приведенных выше видов соединений деталей под сварку позволяет создавать сварные конструкции любой сложности.

Процесс сборки под сварку заключается в подгонке и предварительном соединении простых элементов конструкций в более сложные для последующего окончательного скрепления их с помощью сварки. В процессе сборки узлов и секций производится взаимная установка свариваемых элементов в положение, заданное чертежом и необходимое для выполнения сварки, проверка и задание целой конструкции и ее частям необходимой формы в пределах установленных допусков. Далее производится скрепление собранных сопряжений элементов на прихватках или с помощью зажимных устройств и установка при необходимости временных распоров, стяжек или других элементов, обеспечивающих жесткость изделия при транспортировке или предупреждающих появление чрезмерных сварочных деформаций.

Сборка под сварку является одной из трудоемких и наименее механизированных операций. При сборке необходимо выдержать заданный зазор между соединяемыми деталями, установить детали в проектное положение и закрепить между собой так, чтобы взаиморасположение деталей не нарушилось в процессе сварки и кантовки, а также обеспечить свободный доступ к месту сварки.

В подавляющем большинстве случаев взаимное расположение деталей перед сваркой фиксируется при помощи коротких швов, называемых электроприхватками.

Для стыковых соединений деталей толщиной до 4,0 мм высота усиления электроприхваток установлена равной (или меньшей) толщине одной из свариваемых деталей; для деталей толщиной 4,0 мм и более высота электроприхваток установлена не более 0,5...0,7 меньшей толщины одной из свариваемых кромок, а в угловых соединениях катеты электроприхваток установлены пропорциональными толщине свариваемых деталей и составляют 3,0...6,0 мм. Длина электроприхваток в стыковых и угловых соединениях принимается пропорциональной толщине свариваемых деталей и составляет 15...40 мм. Расстояние между ними ориентировочно устанавливается равным двадцати-сорока толщинам стыкуемых деталей плюс 50 мм.

Для закрепления деталей при сборке конструкций под сварку применяются также эластичные крепления (гребенки, струбицы, талрепы, стежки, прижимы типа "рыбий хвост", угольники с болтами и др.).

Поступающие на сборку конструкций детали должны соответствовать требованиям, приведенным в подразд. 6.3. После сборки деталей под сварку между кромками деталей со скосом кромок образуется канавка, называемая разделкой. Основными конструктивными элементами собранных соединений под сварку являются зазор, угол разделки кромок, притупление и разностенность, которые имеют различные значения в зависимости от толщины и способа сварки.

Одной из важнейших задач сборки соединений конструкций под сварку является обеспечение указанных параметров соединений в соответствии с нормами допускаемых отклонений, предусмотренных государственными стандартами для соответствующих способов сварки. Техническая возможность обеспечения сборки соединений с заданными государственными стандартами значениями зависит от качества подаваемых на сбоку деталей. Также она зависит от качества собственно технологического процесса сборки, который предопределяет возможность появления пригоночных работ и получения сварных швов и сварных соединений, удовлетворяющих предъявляемым к ним требованиям. Наряду с требованиями к деталям, подлежащим сборке под сварку, по точности важной является предварительная зачистка и обезжиривание кромок.

Сборка судовых корпусных конструкций производится с использованием различных стенов (обычных и механизированных), постелей стационарных (в том числе с механизированным подъемом стоек) и передвижных кондукторов для направляющих насадок, агрегатов (станков) для сборки и сварки тавровых балок, для

безразметочной установки и приварки балок набора главного направления плоских секций без электроприхваток и для установки набора по разметке и т. п. От качества и исправности указанной сборочной оснастки зависит качество собранных соединений под сварку, а, следовательно, и качество сварных швов. В связи с этим на отдельные геометрические параметры стенов, постелей и др., оказывающих влияние на качество собранного соединения, установлены допустимые отклонения. Например, на горизонтальность сборочных стенов установлено допускаемое отклонение, равное одной тысячной длины (ширины) стенов, но не более 8,0 мм на весь размер, а отклонение от плоскостности рабочей поверхности стенов допускается 3,0 мм на 1 м, но не более 10,0 мм на длину (ширину) собираемой секции. Допустимые отклонения на положение лекал (стоек) по длине и ширине стационарных постелей зависят от угла подъема наружной обшивки в продольном и поперечном ее сечениях и составляют от $\pm 2,0$ мм для угла подъема более 30° до $\pm 10,0$ мм для угла подъема менее 10° и т. п.

Проверка указанных параметров производится, как правило, при помощи простейших средств измерений: шланговых уровней, теодолитов, нивелиров, линеек, шергеней и т. п., которые характеризуются невысокой точностью измерений.

6.6. ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ И ТОЧНОСТИ СБОРКИ СОЕДИНЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ ПОД СВАРКУ НА ВОЗМОЖНОСТЬ КАЧЕСТВЕННОГО ЕЕ ВЫПОЛНЕНИЯ

Изготовление деталей корпуса судна с необходимой точностью является важной задачей. От качества ее решения зависят возможность появления последующих технологических операций сборки с большим или меньшим объемом пригоночных работ и необходимость ремонта сварных швов. Точность деталей оказывает непосредственное влияние на качество и трудоемкость изготовления и монтажа судовых корпусных конструкций, на конструктивные, технологические и эксплуатационные характеристики как отдельных элементов корпуса судна, так и всего судна.

Абсолютную точность деталей для последующей их сборки с другими деталями при изготовлении металлоконструкций обеспечить в процессе их изготовления невозможно. Поэтому на практике принято

на номинальные размеры деталей устанавливать допускаемые отклонения или припуски, которые удаляются при выполнении последующих операций их сборки с другими деталями.

В машиностроении допуски на размеры деталей, как правило, являются окончательными, т. е. при сборке деталей друг с другом они не изменяются. Такие детали обладают большой жесткостью и изготавливаются с применением высокоточных технологий и оборудования (точение, фрезерование и др.). Сборка этих деталей является окончательной (завершающей) технологической операцией при изготовлении изделия, в результате которой оно приобретает возлагаемые на него эксплуатационные характеристики.

Аналогичный подход к деталям корпуса судна невозможен, так как детали и собираемые из них конструкции не обладают достаточной жесткостью, применяемые технологические процессы изготовления деталей (правка, гибка, механическая и тепловая разделительные резки) не обеспечивают необходимой точности заданных размеров.

Однако на размеры деталей корпуса судна назначаются допускаемые отклонения, что особенно важно для деталей, сопрягаемых с другими деталями. Они назначаются, исходя из условий возможности их исполнения с применением современных технологий и оборудования при изготовлении, а также из условия возможности выполнения последующих операций сборки и сварки конструкций. Но гарантия их качества достигается путем выполнения пригоночных работ при сборке и ремонта сварных швов.

Основными геометрическими параметрами деталей, влияющими на качество конструкций при последующих технологических операциях сборки и сварки, являются габаритные размеры и форма деталей, качество кромок деталей (прямолинейность или иная форма, конструктивные элементы разделки кромок под сварку, плоскостность и др.). Под прямолинейностью или иной (криволинейной) формой кромки детали понимается величина кромки в плоскости детали от заданного техническим документом. Значения этих параметров определяют величины зазоров, получаемых при их соединении с другими деталями под сварку. Под плоскостностью детали понимается расстояние от фактической поверхности плоской детали до прилегающей плоскости при контроле детали. Отклонение от плоскостности детали оказывает влияние на величину разностенности и величину смещений притуплений разделок кромок деталей при сборке соединений под сварку. Качество плоскостности детали обеспечивается при помощи предварительной правки стального проката и готовых деталей.

Отклонения от заданных габаритных размеров и форм деталей в их плоскости определяются разностью заданных значений и фактических размеров и формой кромок. Эти параметры оказывают влияние на качество сборки соединений под сварку (несоответствие габаритных размеров деталей и разделки кромок и др.).

Габаритные размеры и форма плоских деталей зависят от качества технологий тепловой и механической резки. Отклонение от заданной формы гнутых деталей представляет собой расстояние от фактической поверхности детали до поверхности детали с заданной геометрической формой. Значения этих параметров оказывают влияние на величину разностенностей и смещений притуплений при сборке стыковых соединений и на величины зазоров при сборке тавровых соединений. Геометрическая форма гнутых деталей обеспечивается гибочными операциями.

Конструктивные элементы подготовки кромок деталей, подлежащих сборке и сварке с другими деталями, имеют большое значение для качества швов сварных соединений и эффективности изготовления конструкций. Качество кромок деталей без фасок под сварку обеспечивается преимущественно процессами тепловой резки на стационарных и переносных машинах и частично механической резки. Качество фасок под сварку, выполняемых на вырезанных деталях, как правило, обеспечивается тепловой резкой по разметке на переносных машинах и иногда при помощи механической обработки (строгание, фрезерование).

Допускаемые отклонения на размеры подаваемых на сборку деталей и допускаемые отклонения на параметры разделки кромок в собранном соединении не связаны между собой. Фактическая достижимая точность изготовленных деталей при применяемых технологических процессах и оборудовании ниже предъявляемой для обеспечения качественной сварки. Контроль собранной конструкции осуществляется визуально и с помощью измерений непосредственно перед сваркой.

Визуально контролируются правильность формы и расположения свариваемых кромок, качество подрубки корня шва, правильность расположения и количества прихваток, качество обработки и чистоты свариваемых кромок и поверхностей, прилегающих к ним, и т. п. При помощи измерений проверяют общий угол разделки кромок в соединении под сварку, правильность совмещения поверхностей деталей в стыковых соединениях, правильность совмещения поверхностей тавровых и угловых соединений с заданной поверхностью, правильность совмещения или величину смещения свариваемых кромок по корню шва и по поверхности соединения и др.,

руководствуясь при этом требованиями, изложенными в табл. 6.1–6.3. В тех случаях, когда фактические размеры по отдельным параметрам не укладываются в установленные допустимые отклонения, производятся подгоночные работы (подрезка, подрубка, наплавка, поджатие и т. п.).

Сущность пригоночных работ заключается в том, что в составе собираемой конструкции выполняются дополнительные работы с целью доведения поступивших на сборку деталей до необходимых форм и размеров при помощи механической рубки, ручной тепловой резки, ручной дуговой сварки или тепловой строжки, в результате которых собранные соединения под сварку становятся пригодными для получения сварного соединения необходимого качества для заданного технологическим процессом способа сварки.

По причинам, вызвавшим необходимость выполнения пригоночных работ, и характеру применяемых технологических операций пригоночные работы можно условно разделить на два типа.

К первому типу пригоночных работ относятся технологические операции, которые вызываются недостаточным качеством правки и гибки деталей, низким качеством сборочных стенов и постелей и приводят при сборке стыковых соединений к недопустимым зазорам, разностенностям, смещениям притуплений и т. п. Эти пригоночные работы выполняются путем силового обжатия деталей до сведения кромок или их прижатия к сборочным стендам и постелям (или к набору) при помощи скоб, клиньев ручным способом или с использованием средств малой механизации.

Ко второму типу пригоночных работ относятся технологические операции, которые вызываются недостаточным качеством деталей по геометрическим параметрам (габаритные размеры, прямолинейность и конструктивные элементы подготовки кромок) и приводят при сборке стыковых соединений к недопустимым зазорам, углам разделки кромок, смещениям притуплений и т. п.

При сборке тавровых соединений могут иметь место пригоночные работы одновременно обоих типов. Например, для установленных значений волнистости и бухтиноватости плоских деталей разностенность в стыковом соединении может достигать 1,0...1,5 толщины металла, а зазоры в тавровом соединении – до 20,0 мм и более, что значительно превышает установленные требования сварки к сборке конструкций. Приведенные данные свидетельствуют о том, что при установленных допускаемых отклонениях на детали и сборочную оснастку невозможно обеспечить сборку стыковых и тавровых соединений, удовлетворяющих требованиям сварки. Опыт заводов показывает, что даже точно

изготовленные детали и узлы флоров, стрингеров, шпангоутов, шельфов переборок и платформ при сборке подрезаются и подгоняются к опорной поверхности обшивки по месту. Практически весь днищевой и бортовой набор секций вследствие отклонений в обшивке корпуса также подгоняется (подрезается).

Наибольшее значение в соединении под сварку имеет величина зазора, оказывающего решающее влияние на образование прожога или непровара при сварке. Особенно важно обеспечить необходимый зазор в стыковых соединениях, выполняемых автоматической и полуавтоматической сваркой под флюсом, который при сварке на весу допускается не более 1,0 мм. Для ручной сварки покрытыми электродами и полуавтоматической сварки в защитных газах стыковых соединений величина зазора допускается до 3,0 мм. Это положение объясняется различными значениями параметров режимов указанных процессов сварки. Ручная сварка покрытыми электродами и полуавтоматическая сварка в защитных газах выполняются на меньших значениях сварочного тока. Поэтому эти виды сварки обеспечивают небольшой объем расплавленного металла сварочной ванны, положением которого в свариваемом соединении сварщик легко управляет, что позволяет ему заварить практически любой зазор, не опасаясь прожога.

Процессы сварки под флюсом проходят при существенно больших значениях сварочного тока. Расплавленный металл вместе с расплавленным флюсом закрыт слоем флюса, и сварщик в процессе сварки лишен тех возможностей влияния на формирование шва, которые имеются у сварщиков по другим открытым процессам сварки с меньшим объемом расплавленного металла. Поэтому при сварке под флюсом соединений с недопустимыми зазорами может образоваться прожог, а при больших притуплениях в разделке и пониженных сварочных токах возможно образование непровара.

Сопоставление требований к прямолинейности кромок деталей и к соединениям при их сборке под сварку показывает, что при сборке деталей с допустимыми отклонениями от прямолинейности зазор в соединениях под сварку может достигать значений 0,5...2,5 мм, фактически до 60...80% длины стыкуемых кромок под сварку, что не удовлетворяет требованиям сварки под флюсом. При сборке тавровых соединений до 60...80% зазоров достигают значений 15,0...20,0 мм.

На качество сборки и сварки судокорпусных конструкций большое влияние оказывает качество применяемой оснастки (стенды, постели и т. п.). Погрешности горизонтальности и плоскостности сборочных стенов допускают отклонения от горизонтальности до 8,0 мм, отклонения от плоскостности рабочей поверхности стенов допускаются до 10,0 мм на длину секции. Допускаемые отклонения от плоскостности и горизонтальности

сборочных стендов способствуют образованию разностенности в стыковом соединении и пригоночных работ при сборке конструкций.

Анализ приведенных в табл. 6.16 значений допустимых отклонений на всех стадиях изготовления деталей корпуса судна свидетельствует о неизбежности пригоночных работ при сборке конструкций под сварку. Применение пригоночных работ (подрезки, подварки, поджатия и т. п.) при сборке конструкций, с одной стороны, исключает возможность образования прожогов и непроваров. С другой стороны, приводит к изменению размеров конструктивных элементов разделки кромок и соответственно площади поперечного сечения в различных сечениях собранного стыкового соединения, что приводит к изменению размеров усиления сварных швов, увеличению расхода сварочных материалов, трудоемкости сварки и т. д.

Установлено, что уже на стадии подготовки исходных данных для изготовления копир-чертежей для стационарных машин тепловой резки закладываются возможные отклонения от номинальных значений габаритных размеров и прямолинейности кромок, превышающие значения допустимых отклонений у готовых деталей (табл. 6.17, 6.18). Кроме того, на указанные погрешности размеров деталей в последующем будут наложены погрешности, допущенные вычерчиванием копир-чертежей и, самое главное, погрешности, возникающие при вырезке деталей за счет погрешностей технологии и машин, а также за счет остаточных тепловых деформаций. Более высокая точность вырезаемых деталей достигается при использовании числовых программ, исходные данные для которых получены с математической модели, а также при вырезке деталей плазменным способом на машинах с ЧПУ (табл. 6.18).

Отклонение от заданных значений габаритных размеров деталей преимущественно происходит за счет погрешностей, вызванных недостатками машин и технологий, и в значительно меньшей степени за счет остаточных тепловых деформаций. При вырезке деталей кислородным способом на машинах с фотоэлектронным управлением типа "Одесса" погрешность по длине, ширине и суммарная для деталей составила $\pm 4,0$ мм, а при вырезке деталей на машинах с ЧПУ типа "Кристалл" первых выпусков погрешность по длине, ширине и суммарная для деталей, длина которых 5000 мм и более, а ширина 800 мм и более, составляет от $-2,0$ до $+3,0$ мм. При вырезке деталей на переносных машинах кислородным способом по разметке предельные отклонения от прямолинейности составляют 3,0...4,0 мм, и причиной этого являются искривление направляющих, колебания полуавтомата при движении по направляющим, неточность установки резака по-

Таблица 6.16

Допустимые отклонения на контролируемые параметры стальных судокорпусных деталей в процессе их изготовления и их влияние на образование пригоночных работ

Наименование технологических операций		Наименование контролируемых параметров	Допускаемые отклонения от номинальных значений	Способствуют образованию пригоночных работ
Правка стального проката	листового	Местные искривления (бухтинovatость)	2-4 мм на 1,0 м длины, но не более 10 мм на всю длину	При сборке стыковых и тавровых соединений путем силового обжатия
	профильного	Местные искривления	2 мм на 1,0 м, но не более 8 мм на всю длину	
Механическая резка листового проката		Габаритные размеры	$\pm 1,5$ мм при длине до 2 м; $\pm 2,5$ мм при длине более 2 м	При сборке стыковых соединений путем механической рубки, тепловой резки, наплавки и т. п.
		Непрямолинейность стыкуемых кромок	От $\pm 1,0$ до $\pm 2,0$ мм в зависимости от длины детали	
Тепловая резка (плазменная и кислородная)		Габаритные размеры	$\pm 1,0$ мм при длине детали до 1,0 м; $\pm 2,0$ мм при длине детали до 4,0 м; $\pm 3,0$ мм при длине детали до 4,0 м	При сборке стыковых соединений путем ручной кислородной резки, механической рубки, наплавки, силового обжатия и т. п.
		Угол разделки кромок	$\pm 2,0^\circ$	
		Притупление	$\pm 1,0$ мм	
		Смещение притупления	$\pm 1,0$ мм	
Гибка деталей	цилиндрической и конической формы	Зазор между деталью и шаблоном	3,0-5,0 мм	При сборке тавровых соединений путем силового обжатия
	парусовидной и других форм		8,0-10,0 мм	
Правка вырезаемых листовых деталей		Отклонение от плоскости	1,0-1,5 мм при длине детали менее 1,0 м; 2,5 мм при длине детали более 1,0 м	При сборке стыковых соединений путем силового обжатия и т. п.

луавтомата по кернам разметки, выполнение резки за несколько установок направляющих, нарушение режимов резки, вследствие чего ширина реза получается больше допустимой.

Таблица 6.17

Суммарные погрешности исходных данных
для вырезки корпусных деталей

Погрешности подготовки исходных данных	Составление цифровых программ при определении размеров деталей				Вычерчивание копир-чертежей при определении размеров деталей			
	с натурального плаза	с масштабного плаза	с рабочих чертежей	с математической модели	с натурального плаза	с масштабного плаза	с рабочих чертежей	с математической модели
Плазовой разбивки или математической модели	± 3,0	± 2,0	—	± 0,25	± 3,0	± 2,0	—	± 0,25
Определение контуров и размеров деталей	± 3,0	± 2,0	± 0,5	± 0,25	± 4,0	± 2,0	± 0,5	± 0,25
Изготовления носителя информации	± 0,25	± 0,25	± 0,25	± 0,25	± 2,0	± 2,0	± 2,0	± 2,0
Суммарная погрешность исходных данных для изготовления деталей (средне-квadraticное)	±(3,0–4,3)	±(2,0–2,3)	± 0,6	±(0,35–0,45)	±(4,5–5,4)	±(2,8–3,5)	± 2,1	±(2,0–2,1)

Точность деталей, вырезанных механическими способами (по габаритным размерам и прямолинейности), также не удовлетворяет установленным требованиям. Точность гибки цилиндрических и конических деталей не удовлетворяет существующим допускам (3,0...4,0 мм); точность гибки деталей седлообразной и парусовидной формы близка к требованиям отраслевого стандарта (5,0...10,0 мм); точность гибки деталей сложной формы удовлетворяет требованиям отраслевого стандарта (4,0...8,0 мм).

Фактическая точность изготовления гнутых корпусных деталей складывается из следующих погрешностей, величина которых, по данным литературы и проведенным в производственных условиях экспериментальным замерам, составляет: при снятии размеров с плаза до ±2 мм; при изготовлении деревянных шаблонов до ±2 мм; при самом процессе гиб-

Таблица 6.18

Достижимая точность размеров крупногабаритных корпусных деталей при вырезке их тепловой резкой на стационарных машинах в зависимости от способов подготовки исходных данных

Способ вырезки деталей	Способ подготовки исходных данных	Достижимая точность, мм			
		Подготовка исходных данных	Выполнение операции резки	Максимальные	Вероятные (средне-квadraticные)
Плазменная резка на машинах с ЧПУ	С математической модели или с рабочих чертежей	± 0,25	± 1,5	± 1,75	± 1,5
	С масштабной плазовой разбивки	± 1,25	± 1,5	± 2,75	± 2,0
Газовая резка на машинах с ЧПУ	С математической модели или с рабочих чертежей	± 0,25	± 2,0	± 2,25	± 2,0
	С масштабной плазовой разбивки	± 1,2	± 2,0	± 3,2	± 2,3
Плазменная резка на машинах с фотоконтрольным управлением	С математической модели или с рабочих чертежей	± 1,5	± 2,0	± 3,5	± 2,5
	С масштабной плазовой разбивки	± 2,5	± 2,0	± 4,5	± 3,2
Газовая резка на машинах с фотоконтрольным управлением	С математической модели или с рабочих чертежей	± 1,5	± 2,5	± 4,5	± 2,9
	С масштабной плазовой разбивки	± 1,5	± 2,5	± 5,0	± 3,5

ки на прессах и в вальцах в зависимости от сложности кривизны деталей до ±(5,0...11,0) мм.

Опыт изготовления судовых корпусных конструкций с применением механизированных способов сварки под флюсом и в защитных газах свидетельствует о том, что необходимое качество сборки конструкций под сварку, как правило, достигается за счет пригоночных работ. Но они обусловлены недостаточной точностью деталей и низким качеством сборочных стенов и оснастки. Необходимое же качество сварных швов и соединений зачастую достигается после ремонта сварных швов с наружными (несоответствие размеров швов) и внутренними (поры, шлаковые включения и др.) дефектами.

7. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

Таблица 7.1

Химический состав некоторых марок низкоуглеродистых и низколегированных сталей

Марка стали	Тип стали	C, %	Mn, %	Si, %	Прочие	ГОСТ
ВСт2сп	Низкоуглеродистые обычные стали	0,09–0,15	0,25–0,5	0,05–0,17	–	38071
ВСт3сп	– “ –	0,14–0,22	0,4–0,65	0,12–0,3	–	– “ –
20	Качественные	0,17–0,24	0,35–0,65	0,17–0,34	–	1050-74
15Г	Повышенное содержание марганца	0,12–0,19	0,7–1,0	0,17–0,34	–	– “ –
20Г	– “ –	0,17–0,24	0,7–1,0	0,17–0,37	–	– “ –
20К	Котельная	0,16–0,24	0,35–0,55	0,15–0,3	–	5520-69
09Г2С	Кремнемарганцевая	≤ 0,12	1,3–1,65	0,9–1,2	Cu ≤ 0,3	– “ –
10ХСНД	Низколегированная	≤ 0,12	0,5–0,8	0,8–1,1	Cu до 0,65 Ni до 0,8 Cr до 0,9	– “ –

Примечания:

1. Содержание серы в группе сталей ВСт не более 0,05%, в сталях остальных групп – не более 0,04%.
2. Содержание фосфора не более 0,04%.

7.1. СВОЙСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И ИХ СВАРИВАЕМОСТЬ

Под низкоуглеродистой сталью понимают сплав железа с углеродом при содержании последнего $\leq 0,25\%$, а под низколегированной сталью – с содержанием углерода $\leq 0,25\%$ и суммой легирующих $\leq 4\%$. Низкоуглеродистые стали, в зависимости от степени раскисленности, при металлургическом изготовлении могут иметь индексы «кп» – (кипящая сталь), «сп» (спокойная сталь) и «пс» (полуспокойная сталь).

Кипящая сталь характеризуется резко неравномерным распределением серы и фосфора и, как следствие, возможностью образования горячих трещин при сварке и переходом металла в хрупкое состояние при отрицательных температурах. Поэтому, в противоположность спокойным и полуспокойным сталям, она для применения в ответственных сварных конструкциях не рекомендуется. Углеродистая сталь обычного качества по ГОСТ 380-71 поставляется в трех группах: А – в сварных конструкциях не используется (она не имеет химического анализа и поставляется по механическим свойствам); Б – поставляют по химическому составу; В – поставляют по химическому составу и механическим свойствам. Содержание вредных для сварки примесей в этих сталях колеблется: серы $\leq 0,05\%$, фосфора $< 0,04\%$ (пример обозначения ВСт3сп). Углеродистые качественные стали содержат пониженное количество серы, и иногда содержание марганца в них достигает 1% (поставка по ГОСТ 1050-79).

Низколегированные стали имеют большое количество марок, в качестве легирующих добавок применяют Mn, Si, Cu, V, Nb и др. Яркими представителями этих сталей являются 10ХСНД ($\sigma_{0,2} \geq 400$ МПа) и 09Г2С ($\sigma_{0,2} \geq 350$ МПа). Химический состав и механические свойства некоторых наиболее употребляемых марок низкоуглеродистых и низколегированных сталей приведены в табл. 7.1 и 7.2.

Механические свойства некоторых марок низкоуглеродистых и низколегированных сталей

Таблица 7.2

Марка стали	Механические свойства (не менее)				Примечание
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	KCV ⁻⁴⁰ , МДж/м ²	
ВСт2сп	340	220	31	0,4	При T = -20 °C
ВСт3сп	380	240	25	0,5	То же
20Г	460	280	24	0,35	–
09Г2С	500	350	21	0,4	–
10ХСНД	540	400	19	0,5	–

Широкое распространение в промышленности находят микролегированные стали, применяемые для изготовления конструкций ответственного назначения. Они позволяют экономить легирующие элементы и при термомеханической и термообработке обеспечивают высокую прочность и сопротивляемость хрупкому разрушению металла. Обычно эти стали содержат $\leq 0,2\%$ углерода и легируются микродобавкам Al, Cr, Zr, V, Ti, Nb, Mo, В. Они

обеспечивают получение высоких значений прочности. Так, сталь 14Г2АФ имеет $\sigma_{0,2} \geq 400$ МПа и $\sigma_{\text{в}} \geq 550$ МПа, а сталь 12ГНЗМФА $\sigma_{0,2} \geq 600$ МПа и $\sigma_{\text{в}} \geq 700$ МПа.

При малом содержании углерода эти стали обладают удовлетворительной свариваемостью. При сварке на больших погонных энергиях (>100 кДж/см) ударная вязкость металла ЗТВ несколько снижается из-за роста зерна и неблагоприятных фазовых превращений в металле ЗТВ.

В судостроении широко применяется ряд марок конструкционных высокопрочных сталей типа АБ. К ним относятся улучшаемые стали АБ, АБ1, АБ2. Наилучшее сочетание физико-металлургических и технологических свойств феррито-перлитных сталей АБ с пределом текучести 390 МПа и более достигается за счет закалки и высокого отпуска.

Хромоникельмолибденовая сталь марок АБ1 и АБ2 с максимальными значениями предела текучести соответственно 500 и 588 МПа легирована Cr, Mo, V, Al, Ca. После закалки и высокого отпуска в этих сталях формируется мелкодисперсная ферритная структура с карбидной фазой. С учетом обеспечения требований свариваемости содержание углерода в сталях типа АБ составляет 0,08...0,1%. Для обеспечения чистоты этих сталей по содержанию сульфидных и окисных неметаллических включений содержание серы и фосфора в них ограничено соответственно 0,01 и 0,02%.

При сварке этих сталей пластическая деформация, возникающая при остывании шва, способствует повышению его предела текучести. Обычно обеспечение равнопрочности сварных соединений при сварке таких сталей затруднений не вызывает. Сварка на форсированных режимах, повышенной толщине металла однопроходным швом, низкие температуры — все это может привести к появлению закалочных структур на участке перегрева, полной и неполной перекристаллизации металла ЗТВ.

Низколегированные стали иногда поставляются в термообработанном состоянии (закалка для повышения прочностных свойств). При сварке таких сталей на участке рекристаллизации под действием высокого отпуска происходит разупрочнение металла. Эти затруднения преодолеваются технологическими приемами. Так, термоупрочняемые стали рекомендуется сваривать длинными участками, а термически не упрочненные (отожженные), наоборот, короткими (во избежание закалки в ЗТВ).

С повышением погонной энергии растет ширина разупрочненной зоны рядом со швом, что ведет к снижению твердости металла в ней.

Это вызывается высокотемпературным нагревом и малыми скоростями охлаждения. В то же время в зоне могут присутствовать участки, где наиболее резко выражены явления перегрева и закалки; они представляют собой наиболее вероятные места с точки зрения образования холодных трещин.

При сварке короткими участками, по горячим, предварительно положенным проходам, скорость охлаждения всех зон соединения мала. Их структуры равновесны, и последующая термическая обработка не нужна. Только изредка, в особенных случаях, конструкция после сварки может быть подвергнута высокому отпуску для снятия остаточных напряжений и восстановления свойств металла в ЗТВ (нормализация сварных узлов, выполненных ЭШС).

Стойкость против образования горячих трещин в металле шва при сварке этих сталей удовлетворительна. Они в отдельных случаях возникают при содержании углерода более 0,2%, при сварке угловых швов и корневых проходов. Низкоуглеродистые и низколегированные стали хорошо свариваются всеми способами сварки плавления, как правило, без введения предварительного или сопутствующего подогрева.

Важным требованием, предъявляемым к сварным конструкциям из этих сталей, является обеспечение равнопрочности сварных соединений с основным металлом и отсутствие дефектов в сварном шве. Гарантией обеспечения этого требования и служит получение механических свойств металла шва и ЗТВ не ниже нижнего предела прочности соответствующих свойств основного металла. Геометрические размеры и формы шва должны соответствовать требованиям нормативной документации.

Механические свойства металла шва и сварного соединения определяются его структурой, которая зависит от химического состава стали, режимов сварки, предыдущей и последующей термообработки. Как правило, химический состав шва при сварке незначительно отличается от состава основного металла. Различие заключается лишь в стремлении уменьшить содержание углерода в шве с целью предупреждения структур закалочного характера; возможный недостаток прочности при этом компенсируется дополнительным подлегированием металла шва кремнием и марганцем за счет проволоки, флюса или электродного покрытия.

Повышение скорости охлаждения металла шва также может приводить к повышению его прочности при одновременном снижении уровня пластичности и ударной вязкости. Скорость охлаждения металла шва определяется толщиной свариваемого металла, его физи-

ческими свойствами, конструкцией сварного соединения, режимами сварки и начальной температурой изделия.

7.2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ

Под технологией сварки металлических конструкций понимается комплекс указаний о режимах сварки, сварочных материалах, а также последовательно проводимых операциях и приемах, выполняемых в строго заданной последовательности и обеспечивающих получение сварного соединения со свойствами, требуемыми условиями эксплуатации конструкции.

В общем виде технология сварки конструкции должна включать следующие положения.

1. Выбор способов сварки для данной конструкции, обеспечивающих заданные требования при оптимальной производительности. Здесь, как правило, следует выбирать механизированные способы сварки, обеспечивающие высокое и стабильное качество сварных соединений.
2. Выбор формы подготовки свариваемых кромок и размеров их конструктивных элементов, Выбор этот тесно связан со способом сварки и толщиной свариваемых элементов. Обычно, при принятом способе сварки этот выбор производится либо по стандартам, либо по иной нормативной документации.
3. Выбор сварочных материалов (марок покрытых электродов, систем флюс-проволока, защитный газ-проволока) производится для обеспечения равнопрочности сварного соединения. Сварочные материалы выбираются в тесной связи со свойствами основного металла.
4. Выбор режима сварки, количества проходов и других параметров, определяющих внешнюю форму шва. Выбор этот зависит от марки стали, толщины свариваемых элементов и заданной геометрии шва.
5. Определение необходимого сварочного оборудования (источников питания сварочной дуги), исполнительных механизмов (автоматов или полуавтоматов) при механизированных способах сварки, а также необходимых приспособлений и оснастки, обеспечивающих оптимальное качество при изготовлении конкретной конструкции.
6. Выдача рекомендаций об условиях сварки. Сюда относятся указания по технике сварки (порядок выполнения проходов

при многопроходной сварке, последовательность выполнения швов в конкретной конструкции, необходимость подогрева, его параметры, условия его выполнения).

7. Назначение методов и объемов контроля качества.

Основой при разработке технологического процесса являются химический состав, механические свойства и состояние поставки основного металла, из которого изготовлена конструкция, так как это определяет его свариваемость.

Для грамотной разработки технологического процесса сварки необходимо также знать и учитывать эксплуатационные требования к конструкции. Основные сведения, необходимые для разработки рабочей технологии, берутся из принципиальной технологии постройки конструкции (корпуса судна), а также из чертежей конструкции, технических условий ее изготовления, соответствующих государственных (отраслевых) стандартов, технических условий на поставку металлических полуфабрикатов (листы, профили) и т. д.

После выбора способа сварки (если он не обозначен на чертеже) выбирают конструктивные элементы разделки для данного типа сварного соединения. Выбор этот осуществляется при использовании таблиц, соответствующих государственных (или отраслевых) стандартов (см. разд. 6).

При ручной сварке используется ГОСТ 5264-69, при автоматической сварке под флюсом ГОСТ 8713-79, при дуговой сварке в защитных газах ГОСТ 14771-76. В этих стандартах приведены основные виды сварных швов — стыковых и угловых (последние используются для выполнения тавровых, крестовых и нахлесточных сварных соединений).

Если рассматривать соотношение сварных соединений, применяемых для строительства корпуса судна, в процентах от общей протяженности швов, то, в зависимости от применяемой системы набора, наблюдается следующая картина:

тавровые соединения (включая крестовые)*	— 83,5...79,4%
стыковые соединения	— 12,5...17,6%
нахлесточные соединения	— 3,5 ... 2,2%
прочие	— 0,5 ... 0,8%

Кромки деталей могут либо иметь (для одной или обеих кромок), либо не иметь скоса кромок (преимущественно для малых толщин).

* Первая цифра относится к судам с продольной системой набора, вторая — с поперечной системой набора.

Скос может быть прямолинейным либо криволинейным. Назначение разделки кромок состоит в том, чтобы обеспечить (особенно при больших толщинах) полный провар сечения детали по толщине. Такие параметры разделки как величина притупления и зазор между деталями имеют большое значение для качества сварных соединений, особенно при механизированных способах сварки (см. разд. 6).

Вырезка корпусных деталей на судостроительных заводах обычно производится методами термической резки (кислородной или плазменно-воздушной) на машинах с программным управлением типа «Кристалл» или другого типа. При этом возникают неизбежные деформации кромок вырезаемых деталей.

Перспективной является лазерная резка, которая в еще большей степени, чем плазменная, уменьшит деформации вырезаемых деталей и увеличит точность их изготовления.

Стандарты, подобные приведенным выше, имеются не только на подготовку кромок стальных деталей и осуществление основных способов сварки плавлением, но и для ЭШС, а также для сварных соединений, выполняемых из меди, алюминия, титана и их сплавов.

При проектировании сварной конструкции часто встает задача выбора конкретной разделки кромок. Если рассматривать стыковое соединение, то можно видеть, что для выполнения требования равнопрочности (здесь — полного провара сечения) могут быть выбраны различные типы разделок. Так, для толщины 40 мм можно принципиально выбрать симметричную одностороннюю V-образную разделку, двухстороннюю симметричную X-образную и щелевую разделку (при сварке в защитных газах). Если по условиям изготовления узла (возможности подхода, кантовки) может быть применен любой из трех типов подготовки кромок, следует просмотреть экономический аспект, подсчитав для каждой разделки количество наплавленного металла, что в конечном итоге определяет производительность работы.

На рис. 7.1 схематично дана качественная зависимость площади поперечного сечения шва стыкового соединения от толщины листов для разных типов разделки. Как видно из приведенного графика, наибольшим преимуществом обладает щелевая разделка кромок, причем, с увеличением свариваемой толщины это преимущество растет.

Разделку кромок целесообразно применять, начиная с толщин 15,0...20,0 мм (для автоматической сварки под флюсом). При этом предпочтительнее X-образная разделка. В этом случае можно практически исключить угловую деформацию, хотя требуется проведение кантовки изделия. Щелевую разделку рационально применять

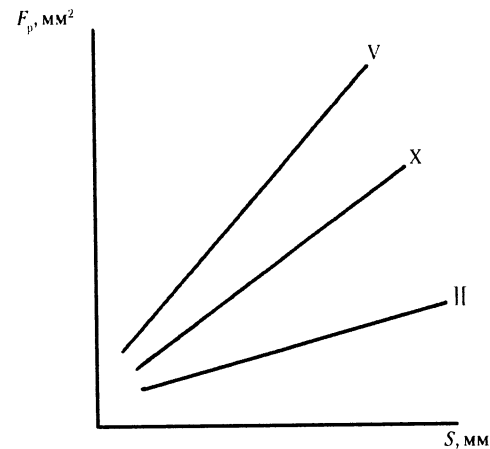


Рис. 7.1. Зависимость площади наплавленного металла от типа разделки и толщины свариваемого металла

только для способов сварки в среде защитных газов, начиная с толщин 20,0 мм (зазор 8,0...12,0 мм).

7.3. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ РУЧНОЙ СВАРКИ

При разработке технологических процессов сварки следует соблюдать ряд требований. В зависимости от толщины свариваемых элементов разделка кромок под выбранный способ сварки производится после вырезки детали газовой резкой или механическим способом (или одновременно с нею). На поверхности и непосредственно на кромках не должно находиться влаги, ржавчины, окалины, масла, краски и других спецпокрытий. Сварка должна производиться только после предварительной зачистки кромок с удалением этих загрязнений непосредственно перед сваркой, путем зачистки наждаком, проволочной щеткой. Места зачистки и размеры зачищаемой поверхности следует назначать в соответствии с указаниями нормативной документации. Ширина полосы зачистки на сторону после сборки стыкового соединения должна быть не менее полуширины шва (считая от его оси +5,0...10,0 мм). Тщательной зачистке подвергаются также кромки после воздушно-дуговой или газовой строжки (например, строжки корня шва). Номинальные характеристики сварочного

оборудования для конкретного способа сварки должны соответствовать параметрам режима, требуемым технологическим процессам.

Сварка корпусных конструкций, как правило, должна производиться в закрытых отапливаемых помещениях. При сварке на открытых площадках место сварки должно быть защищено от осадков и ветра, свариваемые кромки очищены от снега, льда и инея на ширину 100 мм по обе стороны разделки. Кромки перед сваркой обезвожены путем протирки или прогрева газовой горелкой. Для обеспечения необходимого качества сварных швов сварочные работы можно производить и при отрицательных температурах воздуха, однако для углеродистых и низколегированных сталей при толщине листов более 20 мм и температуре ниже $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ свариваемые кромки на ширине 75 мм по обе стороны их разделки должны прогреваться пламенем газовой горелки до температуры $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. При понижении температуры ниже указанного предела сварка должна быть прекращена только после заполнения разделки кромок с одной стороны соединения и выполнения подварочного шва с другой стороны.

Перед сваркой соединений всех видов (стыковые, тавровые, угловые) выбранные режимы должны быть проверены на пробных планках той же толщины, что и свариваемые детали. Непосредственно перед сваркой прихватки, ранее выполненные для соединения деталей между собой с соблюдением необходимых зазоров, должны быть осмотрены во избежание дефектов и очищены от шлака.

При сварке листов разной толщины режимы сварки следует назначать по наименьшей толщине. При сварке мест пересечения стыков и пазов для уменьшения высоты усиления шва и обеспечения провара предыдущий шов должен удаляться до получения заданной формы разделки кромок. При многопроходной сварке последующий проход должен накладываться после тщательной зачистки от шлака предыдущего прохода. Заварку кратеров в местах окончания швов следует производить ручной или полуавтоматической сваркой в углекислом газе. Причем длина шва не должна превышать длину кратера в обе стороны менее чем на 15,0 мм. Швы тавровых соединений, выполняемые за один проход, должны иметь катет, не превышающий 8,0 мм. После окончания сварки швы и прилегающие к ним участки поверхности металла должны быть зачищены от брызг.

К сварке корпусных конструкций должны допускаться сварщики, выдержавшие теоретические и практические испытания, предусмотренные действующей нормативной документацией.

Ручная сварка, несмотря на наличие более совершенных способов механизированной дуговой сварки, еще и сейчас имеет довольно широкое распространение в промышленности благодаря простоте

и универсальности. Так, в судостроении до последнего времени при постройке секций в цеховых условиях объем ручной сварки составлял 12...17%, а на стапеле 35...60%. Тип и марка электрода выбирается в зависимости от химического состава и механических свойств стали, из которой изготавливается конкретная конструкция, а также эксплуатационных требований, к ней предъявляемых. Выбранный тип электрода должен обеспечить равнопрочность сварного соединения основному металлу. Для сварки низкоуглеродистых сталей применяют электроды типов Э42 и Э46. Наиболее часто используются электроды типа Э46Т с рутиловым покрытием, обеспечивающие высокую технологичность и имеющие хорошие гигиенические показатели. При сварке этих сталей электродами марок АНО-3, АНО-4, МР-1, МР-3 обеспечивается следующий уровень механических свойств металла шва: $\sigma_{0,2} \geq 380\text{ МПа}$, $\sigma_b \geq 480\text{ МПа}$; $\delta \geq 25\%$; $\psi \geq 65\%$; $KCV \geq 1,5\text{ МДж/м}^2$. Хорошие результаты дает применение электродов типа Э42А марки УОНИ 13/45 и УОНИ 13/55, предназначенных для сварки на постоянном токе обратной полярности. Эти электроды позволяют получить металл шва, достаточно хорошо сопротивляющийся образованию горячих трещин, и широко применяются на судостроительных верфях страны.

Диаметр электрода $d_s = f(S)$ выбирают в зависимости от толщины свариваемого металла по соответствующим таблицам справочника или стандарта.

Силу тока выбирают в зависимости от диаметра электрода:

$$I_{\text{св}} = md_s,$$

где m — эмпирический коэффициент, зависящий от диаметра электрода ($m = 40...50$ для $d_s = 4,0...6,0\text{ мм}$).

Эта формула удобна для расчета, однако условна, так как в ней ток есть линейная функция диаметра, хотя действительно нужно считать площадь сечения электродного прутка:

$$I_{\text{св}} = jF_s,$$

где j — плотность тока, А/мм^2 .

Так принимают величину тока при сварке в нижнем положении; при сварке в вертикальном и потолочном положении сила тока должна быть уменьшена на 15...20% во избежание стекания ванны расплавленного металла.

Глубина проплавления основного металла при ручной сварке относительно невелика (1,0...4,0 мм), и формирование шва идет в ос-

новном за счет расплавления электродного металла. Ширина шва и катет таврового соединения зависят от диаметра электрода и размаха поперечных колебаний его конца при сварке.

Для хорошего формирования шва при многопроходной сварке сечение каждого прохода должно быть:

– для первого (корневого) прохода

$$F_{н1} \leq 8d_{э};$$

– для последующих проходов

$$F_{нi} \leq 12d_{э}.$$

Фактическая площадь поперечного сечения металла, наплавляемого за один проход:

$$F_{н} = \frac{\alpha_{н} I_{св}}{v_{св} \gamma},$$

где $\alpha_{н}$ – коэффициент наплавки, г/А·ч; γ – плотность металла, г/см³.

Скорость ручной сварки по условиям хорошего формирования и утомляемости сварщика принимают в пределах 12...16 м/ч.

Число проходов при многослойной сварке определяют по формуле

$$n = \frac{\sum F_{нi}}{F_{н}}.$$

На рис. 7.2 показаны некоторые приемы при сварке протяженных и многослойных швов.

Основными показателями, характеризующими процесс расплавления электрода, являются коэффициенты расплавления $\alpha_{р}$ и наплавки $\alpha_{н}$:

$$\alpha_{р} = \frac{G_{р}}{It}, \quad \alpha_{н} = \frac{G_{н}}{It},$$

где $G_{р}$, $G_{н}$ – масса расплавленного и наплавленного металла соответственно за время горения дуги t ; I – сила сварочного тока, А.

Неравенство для большинства способов дуговой сварки этих коэффициентов объясняется потерями электродного материала на разбрызгивание, угар и окисление. Потери эти учитываются коэффициентом

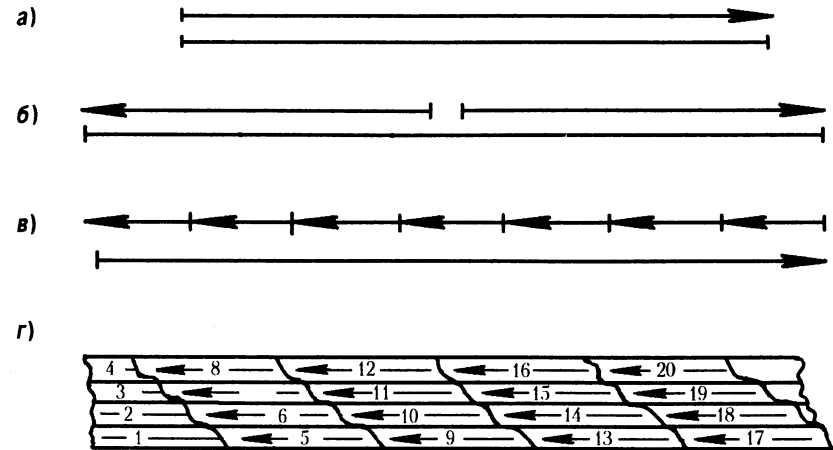


Рис. 7.2. Приемы выполнения сварных соединений ручной сваркой при разной протяженности и толщине:

a – короткие; *б* – большой длины; *в* – обратно-ступенчатые швы; *г* – сварка каскадом (в разделку при большой толщине)

$$\psi = \frac{G_{р} - G_{н}}{G_{р}} \cdot 100.$$

Производительность процесса сварки относительно невелика. Ее можно определить из формулы

$$G_{н} = \alpha_{н} I_{св} t,$$

откуда

$$t = \frac{G_{н}}{\alpha_{н} I_{св}} = \frac{F_{р} \gamma l_{ш}}{\alpha_{н} I_{св}},$$

Значения коэффициентов $\alpha_{н}$ и $\alpha_{р}$ зависят от состава стержня и покрытия, рода и полярности сварочного тока и др.

Для электродов, получивших наибольшее распространение для сварки низкоуглеродистых сталей, $\alpha_{р} = 7...13$ г/А·ч, $\alpha_{н} = 6...12,5$ г/А·ч, $\psi = 5...25\%$.

Массу электродов, необходимых для сварки шва данной протяженности, можно определить по формуле

$$G_{э.л} = G_n k_1 (1 + \psi),$$

где k_1 — коэффициент, учитывающий массу покрытия.

Режимы ручной сварки в зависимости от толщины металла, конструктивного оформления сварного соединения, его пространственного положения и диаметра электрода выбираются по таблицам справочников либо действующей нормативной документации.

Глубина проплавления основного металла в диапазоне принятых режимов сварки относительно невелика, и основную долю металла шва составляет наплавленный металл (65...75%). Основными параметрами режимов ручной сварки являются диаметр электрода и сила тока; скорость сварки обычно не нормируется.

В принципе, скорость ручной сварки может быть определена по формуле

$$v_{св} = \frac{\alpha_n I_{св}}{3600 \gamma F_n},$$

однако на практике этим параметром пользуются редко, ибо на скорость прямолинейного перемещения ванны влияет характер поперечных перемещений конца электрода и конструктивные элементы разделки.

Напряжение дуги при ручной сварке изменяется в достаточно узких пределах, оно зависит от марки электродов и рекомендуется в паспорте на них (обычно оно колеблется в пределах 18...25 В). Современные электроды имеют высокую разрывную величину дуги (что позволяет варить и на более высоких напряжениях, однако это недопустимо ввиду ослабления газовой защиты и появления пористости в металле шва).

Производительность ручной сварки относительно невелика; она значительно зависит от погонной энергии

$$q_n = \frac{q}{v_{св}} = \frac{I_{св} U_d \eta_n}{v_{св}},$$

где η_n — эффективный коэффициент (КПД) использования тепла дуги.

Для ее увеличения возможно увеличение сварочного тока. Однако тут встречаются два препятствия. При длине электрода 400...450 мм его стержень нагревается джоулевым теплом (при протекании по нему сварочного тока). В зависимости от типа покрытия (органическое или неорганическое) температура нагрева стержня во время его плавления должна быть ограничена температурами 400 и 700 °С соответственно, так как дальнейшее увеличение ведет к нарушению цельности покрытия до его плавления и делает плавление стержня неравномерным. Поэтому плотность тока на конкретный диаметр электрода приходится ограничивать до 10...18 А/мм². Увеличение же диаметра электрода увеличивает массу системы электрод — электрододержатель — токоподводящий кабель, приводит к утомляемости сварщика и затрудняет качественное ведение процесса.

Повышение производительности ручной дуговой сварки плавящимся электродом может быть осуществлено при соблюдении ряда условий. К ним относятся:

- выбор оптимальной марки и диаметра электрода с учетом конкретного технологического процесса;
- использование экономичных видов разделки кромок под сварку (уменьшение площади наплавленного металла);
- ограничение применения форсированных режимов с целью уменьшения повышенного разбрызгивания наплаваемого металла (использование для этой цели прибора для контроля параметров режима);
- применение специальных электрододержателей для уменьшения длины огарка;
- использование электродов с железным порошком в покрытии (они дают увеличение коэффициента наплавки и позволяют несколько увеличить силу тока);
- применение термопалов для прокалики и хранения электродов;
- использование современных выпрямителей (ВД-306Д, ВД-506Д, ВД-3в, ВД-309, ВД-313);
- совершенствование организации труда сварщика, уменьшающей непроизводительные затраты времени.

Заполнение разделки каскадным способом обеспечивает автотермообработку металла ранее выполненных проходов (см. рис. 7.2, б).

Механические свойства сварного соединения и металла шва, выполненного ручной сваркой, в основном зависят от структуры всех зон сварного соединения, которая определяется химическим составом стали, характером ее термической обработки и режимами свар-

ки. При ручной сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей металл шва, как правило, незначительно отличается по химическому составу от основного металла. Структурные изменения в ЗТВ и металле шва лишь при высоких скоростях охлаждения способствуют некоторому увеличению прочности и снижению пластичности (рис. 7.3), что объясняется изменением строения перлитной фазы и ее количеством. Как правило, значительное увеличение скоростей охлаждения и появление зон закалки наблюдается при сварке однослойных угловых швов или последнего слоя многослойных угловых и стыковых швов при наложении их на уже холодные, выполненные ранее сварные швы.

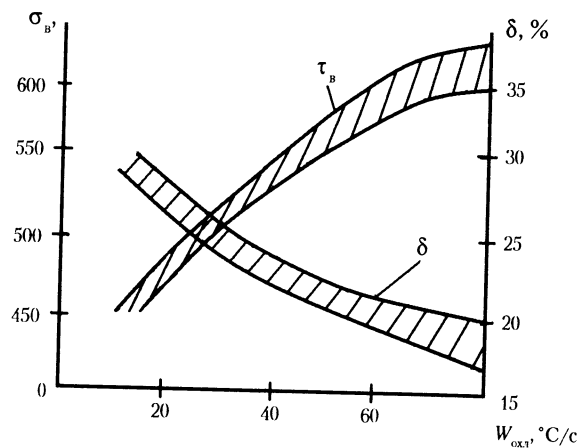


Рис. 7.3. Влияние скорости охлаждения на характер изменения механических свойств металла шва при сварке низколегированных сталей

Это же относится к первому корневому проходу при большой толщине (>50 мм) свариваемого металла. Ранее выполненные слои при многослойной сварке подвергаются действию повторного термического цикла и имеют благоприятную мелкозернистую структуру.

7.4. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ

Схема процесса автоматической сварки под флюсом дана на рис. 2.16, в разд. 2 описаны его основные особенности. При дуговой

сварке под флюсом значительно возрастает глубина проплавления и появляется возможность сварки стыковых соединений без разделки кромок за один проход в толщинах до 24 мм. При выполнении такого процесса необходимы, начиная с толщины 14 мм, соответствующее увеличение зазора между стыкуемыми кромками и применение специальных приспособлений, предотвращающих прожог и формирующих усиление обратной стороны шва (см. рис. 2.18), ибо увеличение свариваемой толщины без увеличения зазора ухудшает формирование усиления сварного шва.

Режим сварки выбирается из расчета обеспечения сплошного провара стыкового соединения или заданного катета при сварке тавровых и угловых соединений. Форма провара и сварного шва при обеспечении хорошего формирования его поверхности характеризуется катетом k (для тавровых соединений) и глубиной проплавления H , высотой усиления g и шириной усиления B для стыковых соединений.

Форма усиления шва характеризуется коэффициентом формы усиления

$$\psi_B = \frac{B}{g},$$

а форма провара — коэффициентом

$$\psi_{пр} = \frac{B}{H},$$

где B — ширина шва, мм; H — глубина провара, мм; g — высота усиления, мм.

Установившиеся требования к этим коэффициентам определяют $12 > \psi_B > 7$ (это условие обеспечивает достаточную эксплуатационную надежность соединений при наличии ударной и вибрационной нагрузки) и $5 > \psi_{пр} > 1,5$ (это требование определяет форму провара и технологическую прочность металла шва).

При сварке стыковых соединений толщин 14,0...24,0 мм и выше применяют разделку кромок. Ее выбирают в зависимости от толщины свариваемых элементов, положения свариваемого соединения в конструкции и наличия сварочного оборудования на заводе-изготовителе. В любом случае следует стремиться выбрать конструктивные элементы разделки так, чтобы обеспечить наивысшую производительность процесса (минимум проходов при благоприятных режимах сварки) при нужном качестве сварного шва. Выбор конструктивных эле-

Таблица 7.3

ментов осуществляется в соответствии с государственным или отраслевым стандартом.

Количество проходов при многопроходной сварке рассчитывается в зависимости от сечения каждого прохода (режима сварки) и площади сечения разделки. Для выбора режимов сварки в настоящее время пользуются таблицами или номограммами, составленными с привлечением большого количества экспериментального и производственного материала. Примеры режимов сварки различных соединений для некоторых толщин приведены в табл. 7.3. Все режимы даны применительно к конкретным маркам стали, свариваемым толщинам и конструктивным элементам разделки кромок. Однако существуют и ориентировочные способы расчета режимов сварки по условиям полного проплавления или заданного катета (для тавровых соединений).

Если рассматривать двухстороннее стыковое соединение без разделки кромок (по одному проходу с каждой стороны) и тавровое соединение, выполняемое за один проход, то порядок расчета можно принять следующий.

Сначала выбирают род тока и его полярность (при постоянном токе). Определяют расчетную глубину проплавления:

$$H_{\text{пр}} = \frac{S}{2} + (2...3) \text{ мм} - \text{для стыковых соединений};$$

$$H_{\text{пр}} = 0,7k - \text{для тавровых соединений}.$$

Значения сварочного тока выбираются по формуле

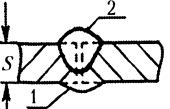
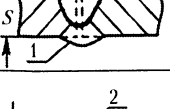
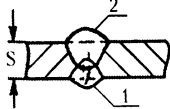
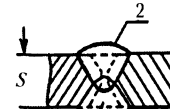
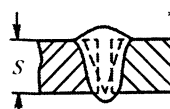
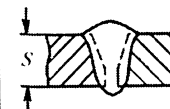
$$I_{\text{св}} = \xi H_{\text{пр}};$$

скорость сварки

$$v_{\text{св}} = \frac{I_{\text{св}}^2}{\xi' H_{\text{пр}}}.$$

Величины коэффициентов ξ и ξ' находят по специальным таблицам с учетом конструкции сварного соединения, диаметра электрода, рода и полярности тока. По значению силы тока, с учетом его допустимой плотности, выбирают диаметр электрода. Важным параметром режима является вылет электродной проволоки из токоведущего мундштука. Обычно его принимают в пределах $l_{\text{эл}} = 10d_{\text{эл}} + 5$ мм. Его изменения в пределах

Примеры назначения режимов автоматической сварки под флюсом для некоторых типов стыковых соединений

Толщина листа <i>S</i> , мм	Эскиз шва	Режим сварки									
		Первый шов					Второй шов				
		Номер прохода	Диаметр электрода, мм	Сила тока, А	Напряжение на дуге, В	Скорость сварки, м/ч	Номер прохода	Диаметр электрода, мм	Сила тока, А	Напряжение на дуге, В	Скорость сварки, м/ч
12		1	4	800-850	37-39	32-34	2	4	850-900	38-40	32-39
14		1	4	850-900	36-38	26-28	2	4	900-950	40-42	34-36
18		1	5	900-950	40-42	28-30	2	5	900-950	40-42	36-38
28		1	6	1000-1100	40-42	29-31	2	6	1000-1100	40-42	26-30
10		1	4	940-980	38-40	34-36					
24*		1	5	960-980	38-40	23-25					

* Сварка на неподвижной флюсо-медной подкладке на постоянном токе обратной полярности.

±25% практически не влияет на параметры шва; при большем же изменении (увеличении) увеличивается коэффициент наплавки, снижается глубина проплавления и растет усиление шва.

По выбранному диаметру электрода и силе тока можно определить оптимальное напряжение дуги

$$U_d = 20 + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{d_3^{0,5}} I_{св} \pm 1.$$

Следует отметить, что расчетные величины значений параметров режима вносить в технологическую исполнительную документацию следует с допуском, имея разбег значений по току ±25 А (при токах до 1000 А) и ±50 А (при токах более 1000 А), а напряжение дуги с разбегом ±2 В.

Механизированные способы сварки под флюсом, как правило, предназначены для выполнения швов в горизонтальном (нижнем) положении. Возможно, допустимые углы наклона шва к горизонту в направлении сварки составляют 8...10°, угол наклона в поперечном положении не более 10...20°. Для качества шва большое значение имеют точность сборки (отсутствие недопустимых зазоров и деформации кромок), качественное выполнение прихваток, соединяющих детали, и хорошая очистка района свариваемых кромок от ржавчины и органических загрязнений.

Начало и конец сварного стыкового шва должны выполняться на выводных, удаляемых после сварки соединения, планках, так как в начале и конце процесса из-за его нестабильности возможно образование дефектов (например, непровара). Планки выполняются из металла той же марки и толщины, что и свариваемый металл.

Механические свойства металла шва и сварного соединения при этом способе (как и при ручной сварке этого класса сталей) зависят от химического состава стали и металла шва, свариваемой толщины и режима сварки. Ввиду того, что из-за относительно высоких режимов сварки доля участия основного металла в металле шва значительна, нужно учитывать переход легирующих элементов из основного металла в металл шва.

При сварке однослойных стыковых и угловых швов на конструкциях, выполненных из низколегированных сталей, на режимах с малой погонной энергией можно опасаться появления в ЗТВ закалочных структур, особенно при сварке деталей большой толщины (см. рис. 7.3).

При сварке низколегированных термоупрочненных сталей возможно разупрочнение металла в ЗТВ. Потому здесь рекомендуется

использовать режимы с малой погонной энергией. Для сталей без термической обработки в состоянии поставки рекомендуется применять режимы с повышенной погонной энергией.

При сварке низкоуглеродистых сталей достаточный уровень механических и технологических свойств сварных соединений достигается при использовании сварочных проволок Св-08, Св-08А, Св-08ГА и Св-10ГА в сочетании с кислыми высококремнистыми флюсами АН-348-А, ОСЦ-45 и др. Также сочетание позволяет получать швы с глубоким проплавлением за один проход без разделки кромок. Высокая доля участия основного металла в формировании шва не снижает его технологической прочности из-за относительно небольшого содержания углерода в металле шва. Сварка может производиться как на переменном, так и на постоянном токе (полярность обратная).

Технология сварки низколегированных сталей не отличается от технологии сварки низкоуглеродистых сталей. Для сталей марок 16ГС, 09Г2С, 10Г2С, работающих при эксплуатационных температурах до -40 °С, рекомендуются сварочные проволоки Св-08ГА, Св-10ГА, а при температурах до -70 °С — проволоки Св-10НМА, Св-10Н10 и Св-08МХ с целью обеспечения достаточного уровня ударной вязкости. В качестве флюсов основное применение находят АН-348 и ОСЦ-45 (или подобные им марки).

7.5. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ

Для сварки конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей широкое применение получила механизированная сварка в среде активных защитных газов, в качестве которых наиболее распространен дешевый и недефицитный углекислый газ (СО₂). Применяется полуавтоматическая (проволокой диаметром 0,8...2,0 мм) и автоматическая (проволокой диаметром 2,0...3,5 мм) сварка. В качестве защитной среды в последнее время часто используют газовые смеси с различными сочетаниями активных и инертных газов. В качестве электродной проволоки применяют проволоки Св-08ГС, Св-08Г2С, Св-08ХГ2С (в зависимости от марки свариваемой стали).

Конструктивные элементы разделки кромок практически одинаковы с таковыми при ручной сварке. Их виды и конкретные размеры указаны в соответствующих государственных и отраслевых стандартах (см. разд. 6).

Таблица 7.4

Примеры выбора режимов полуавтоматической сварки в углекислом газе для некоторых видов сварных соединений

Толщина листа, мм	Эскиз подготовленного соединения и выполнение шва	Режим сварки								Примечание		
		Первый шов				Второй шов						
		Номер шва	Диаметр электрода, мм	Сила тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки м/ч	Номер шва	Диаметр электрода, мм	Сила тока, А		Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч
6-7		1	1,6	280-300	28-30	30-35	2	1,6	280-300	28-30	30-35	Расход газа Q = 8...10 л/мин
6-8		1	1,6	300-350	30-32	45-50	1	1,6	300-350	30-32	45-50	k = 4 Q = 8-10 л/мин
5+5		1	1,6	145-175	22-24	-	-	-	-	-	-	Q = 8-10 л/мин

Полуавтоматическая сварка плавящимся электродом может выполняться во всех пространственных положениях, что делает процесс универсальным и обладающим по сравнению с ручной сваркой открытыми электродами более высокой производительностью.

Режимы сварки стыковых и тавровых соединений хорошо разработаны и сведены в таблицы и номограммы, приводимые в справочниках и отраслевой нормативной документации. Выбор режима зависит от диаметра электродной проволоки, толщины свариваемого металла и пространственного положения соединения (рис. 7.4).

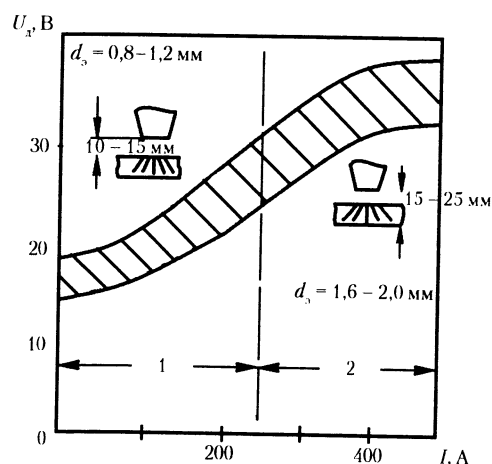


Рис. 7.4. Режимы, рекомендуемые при полуавтоматической сварке в CO_2 :

1 — потолочное и вертикальное положение; 2 — нижнее положение

Угловые швы сваривают с применением электродной проволоки диаметром 0,8...1,2 мм (зона 1) на режиме $I_{св} = 160...180$ А, $U_d = 20...22$ В. За один проход выполняют швы катетом до 8,0 мм, выше — за 2-3 прохода. При вертикальном положении швов катетом до 5,0 мм сваривают сверху вниз, большим катетом наоборот — снизу вверх. Расход углекислого газа при сварке стыковых соединений 500...600 л/ч и при сварке тавровых соединений 300...400 л/ч. Примеры назначаемых режимов даны в табл. 7.4. Сварочный ток, который обуславливает размеры шва и производительность процесса, зависит от диаметра и устанавливается в соответствии со скоростью подачи проволоки.

В углекислом газе сварку ведут в основном короткими замыканиями дугового промежутка, реже — с крупнокапельным переносом металла. В чистом CO_2 не удастся найти критический ток, при котором процесс плавления проволоки переходит в мелкокапельный (струйный). При крупнокапельном переносе металла происходит значительное разбрызгивание, которое иногда уменьшают погружением дуги в ванну. При этом внешняя составляющая длина дуги, при которой шов формируется хорошо, а разбрызгивание относительно невелико, составляет 2,0...3,0 мм. Мелкокапельный перенос может быть достигнут с применением проволок, активированных щелочными и щелочноземельными элементами, а также в смеси CO_2 с инертными газами.

Стыковые соединения на металле толщиной до 4,0 мм сваривают без разделки кромок, для улучшения формирования шва соединения толщиной более 3,0 мм сваривают на медной, керамической либо остающейся металлической подкладке. Формирование шва при сварке деталей из тонколистового материала лучше происходит при сварке в вертикальном положении сверху вниз. Металл толщиной 4,0...12,0 мм сваривают за два прохода с двух сторон, толщиной 15,0...20,0 мм сваривают за три прохода при V-образной разделке кромок с углом 60° и притуплением 2,0...4,0 мм. При толщине 20,0...30,0 мм применяют двухстороннюю симметричную разделку кромок. Металлы большей толщины целесообразно сваривать при узкой щелевой разделке кромок за несколько проходов. Сварку плавящимся электродом можно выполнять во всех пространственных положениях. Потолочные швы сваривают «углом назад» при минимальных значениях силы тока и напряжения проволокой $d_3 = 0,8...1,4$ мм.

В последние десятилетия разработана также вертикальная автоматическая сварка стыковых соединений конструкций (в том числе корпусов судов), начиная с толщин 12,0 мм. Сварка выполняется специализированными автоматами (типа «Ритм-20») с применением принудительного формирования шва. Сварка производится при вертикальном положении свариваемого стыка, собираемого с определенным зазором, величина которого зависит от свариваемой толщины. Формирование шва происходит в объеме, ограниченном с двух сторон торцами свариваемых пластин. По плоскости листов с одной стороны объем ограничен неподвижной медной подкладкой, а с другой — медным охлаждаемым ползуном, перемещающимся вместе с автоматом.

Как уже отмечалось, в современной промышленности совершенно четко наметилась тенденция применения при полуавтоматической сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей порошковой проволоки диаметром 1,2...1,6 мм в смеси защитных газов.

Наиболее широкое применение получили проволоки рутилового типа. Они обеспечивают хорошее формирование шва, увеличивают производительность наплавки и приводят к мелкокапельному переносу металла в дуге. Последнее значительно уменьшает разбрызгивание, а значит, снижает трудоемкость работ по зачистке брызг с поверхности основного металла и металла шва (рис. 7.5). Этому же способствует применение комбинированной защитной смеси 92% Ar + 6% CO₂ + 2% O₂. Существует много марок порошковой проволоки зарубежного производства поставки фирм Швеции, Германии, Кореи и др. В последние годы для сварки этой группы сталей разработа-

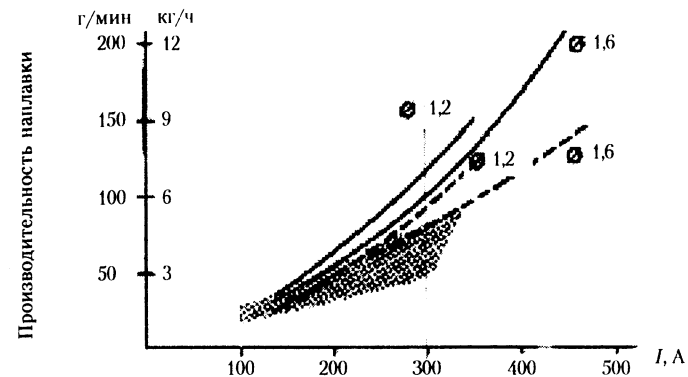


Рис. 7.5. Сравнительная производительность наплавки, выполненная:

— порошковой проволокой; - - - — сплошной проволокой;
— штучными рутиловыми электродами с металлическим порошком в покрытии

на отечественная марка порошковой проволоки диаметром 1,2 мм (48ПП-8М); она по своим свойствам вполне конкурентна зарубежным аналогам. Переход с ручной дуговой сварки покрытыми электродами на полуавтоматическую сварку в углекислом газе обеспечивает рост производительности процесса сварки в 2,5–3,5 раза, примерно в 2 раза снижаются энергозатраты и время выполнения 1 м шва (без учета времени смены электрода).

На рис. 7.6 приведено сравнение по основным показателям различных видов и способов дуговой сварки.

При сварке проволокой сплошного сечения в газовых смесях по сравнению со сваркой в углекислоте в 1,5–3 раза снижается разбрызгивание электродного металла на сварной шов и околошовную зону. Это уменьшает трудозатраты на удаление брызг со свариваемых поверхностей. Здесь возможно применение традиционных сварочных источников типа ВДУ-630, ВДУ-506С, ВДУ-800 и др. Считается предпочтительным применение инверторных синергетических источников тока «Sinermig-410», «Радуга-250»*. Это позволяет повысить производительность процесса сварки минимум на 25%.

* Синергетическое (иначе — программируемое) изменение параметров тока дуги при изменении ее напряжения, что определяет поддержание заданного режима на оптимальном уровне.

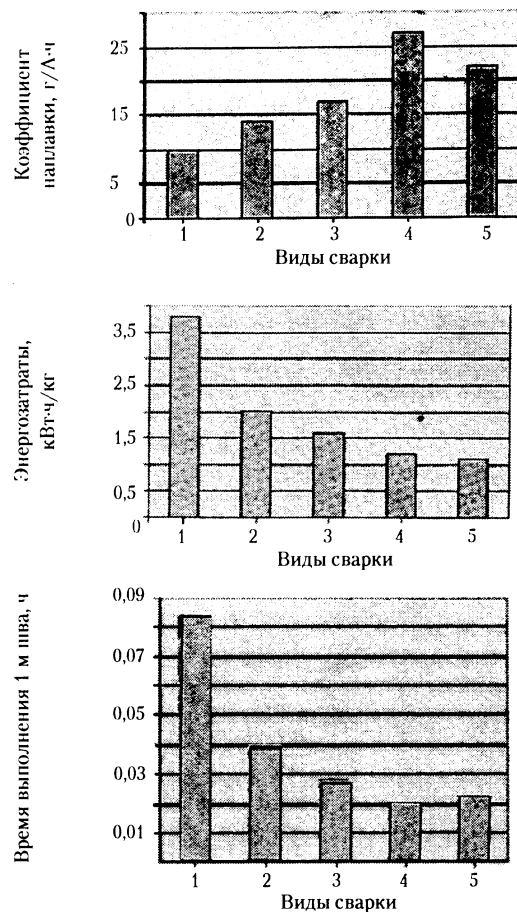


Рис. 7.6. Зависимость коэффициента наплавки α_n , энергозатрат и производительности от вида сварки:

1 – ручная дуговая сварка; 2 – полуавтоматическая сварка в углекислом газе проволокой сплошного сечения; 3 – полуавтоматическая сварка проволокой сплошного сечения в газовых смесях; 4 – полуавтоматическая сварка порошковой проволокой на традиционных источниках питания; 5 – полуавтоматическая сварка сплошной проволокой в газовых смесях на инверторных синергетических источниках питания*

* Карасев М. В. и др. Анализ наиболее эффективного использования различных видов сварочного оборудования и сварочных материалов в производстве металлоконструкций // Сварка в Сибири. 2002. Ноябрь. С. 32–47.

При переходе на порошковую проволоку в углекислоте или смеси газов уменьшаются требования к квалификации сварщиков. По данным шведской фирмы ESAB, несмотря на увеличение стоимости порошковой проволоки в 2–4 раза по сравнению со сплошной, стоимость 1 м сварного шва снижается в 2 раза. Механические характеристики металла шва, сваренного различными марками порошковой проволоки (за исключением самозащитной), во всех случаях выше, чем при сварке проволокой сплошного сечения, и выше, чем механические характеристики основного металла (для сталей ВСтЗсп, 09Г2С, 10ХСНД) (табл. 7.5).

Таблица 7.5

Механические свойства металла шва

Проволока	$\sigma_{в'}$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа, не менее	δ , %, не менее	Ударная вязкость KCV, МДж/м ² , не менее	
				-40 °С	-20 °С
PZ6102	550–650	460	24	0,54	–
ZP6103	510–600	420	22	–	0,54
PZ6130HS	510–580	420	24	0,54	–
PZ6103HS	510–600	420	22	–	0,47
PZ6104	520–620	420	22	0,54	–

Разница механических свойств металла шва при сварке этих сталей различными видами полуавтоматической сварки заключается в увеличении пластических характеристик металла при применении порошковых проволок. Порошковая проволока дает самую высокую ударную вязкость. При сварке сплошной проволокой в смесях защитных газов ударная вязкость несколько ниже (KCV = 12...15,8 Дж/см² при $T_{исп} = -40$ °С); еще ниже ударная вязкость металла шва при сварке сплошной проволокой в углекислом газе (KCV = 8,4 Дж/см² при $T_{исп} = -40$ °С).

7.6. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ДРУГИМИ СПОСОБАМИ

Здесь прежде всего следует отметить *электрошлаковую сварку*. Технология и аппаратура для ЭШС подобна таковой для вертикальной свар-

ки в CO_2 . В судостроении она может применяться при вертикальных монтажных стыках. Режимы этого способа сварки характеризуются сварочным током $I_{\text{св}}$, напряжением на шлаковой ванне $U_{\text{ш}}$, скоростью подачи электродной проволоки $v_{\text{под}}$ и скоростью сварки $v_{\text{св}}$.

Для относительно небольших толщин (до 50 мм) применяются автоматы с подачей одной электродной проволоки. Обычно применяют проволоку диаметром 3,0 мм, подаваемую без поперечных колебаний. Наиболее употребительна марка проволоки Св-10Г2С и флюсы марок АН-8, ФЦ-7, ОСЦ-45 и АН-348 (для сталей Ст4с, 09Г2, 10ХСНД). Следует отметить, что чем больше свариваемая толщина, тем более экономически выгодно применять ЭШС.

Для судостроения актуальна проблема приварки шпилек, количество и номенклатура которых на каждом корпусе судна весьма велика. Диаметры шпилек колеблются в пределах 4,0...14,0 мм, и приварка их ручной сваркой с полным проваром весьма трудоемка. Для увеличения производительности этого процесса при высоком качестве шва применяется полуавтоматическая приварка шпилек с флюсовой шайбой (рис. 7.7). Приварка производится с помощью специального пистолета. Флюсовые шайбы изготовляют из мелко-молотого флюса с замесом на жидком стекле с последующей сушкой и прокаткой.

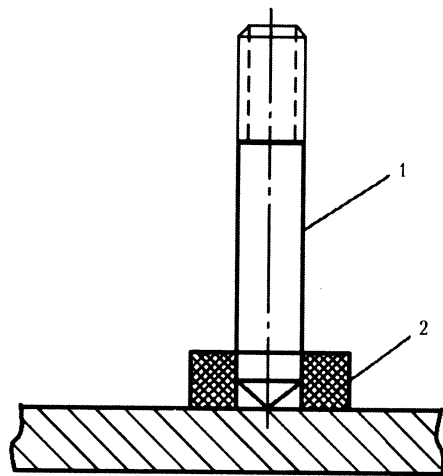


Рис. 7.7. Схема приварки шпилек с применением флюсовых шайб.

1 – шпилька; 2 – флюсовая шайба

При расплавлении флюсовой шайбы создается шлаковая защита расплавленного металла и обеспечивается хорошее формирование металла шва. При приварке тонкой обшивки (1,0...4,0 мм) к каркасу (и подобного рода конструкциям) может применяться точечная сварка под флюсом с проплавлением тонкого листа — так называемой электрозаклепкой.

Механизированная сварка под флюсом и в среде защитных газов имеет несколько разновидностей. В производственных условиях следует выбирать тот способ, который наиболее целесообразен для конкретного предприятия. Здесь учитывается как технический, так и экономический аспекты.

С технической точки зрения, вариант механизированной сварки выбирается в зависимости от свариваемой толщины, расположения соединения в конструкции, наличия (или возможности приобретения) нужного сварочного оборудования. Если рассматривать автоматическую сварку под флюсом (как и в защитном газе), то здесь могут быть следующие основные варианты (для выполнения стыкового соединения).

Односторонняя сварка на весу производится тогда, когда не требуется провара всего сечения. Здесь подкладки какого-либо рода отсутствуют, и правильное и равномерное формирование шва зависит от величины и равномерности по длине зазора в стыке (обычно его величина равна 0,5 мм) и строгого соблюдения заданных режимов. При необходимости полного провара сечения при односторонней сварке применяется сварка на *флюсовой подушке*, на *медной подкладке* или, что наиболее рационально, на *флюсо-медной подкладке* (см. рис. 2.18). В том случае, если это не продиктовано какого-либо рода запретами, возможно применение остающейся стальной подкладки.

Существует также способ *односторонней сварки на медном ползуне*, перемещающемся вместе с автоматом на противоположной плоскости соединения. Специальным ножом через зазор между свариваемыми деталями ползун соединен с автоматом. Некоторое неудобство представляет то, что зазор должен быть открыт на всем протяжении стыка, а величина его строго выдерживается. Однако способ по сравнению с двухсторонней сваркой более производительен (в диапазоне толщин 6,0...18,0 мм), а значит и более дешев.

7.7. ОСНОВЫ СБОРКИ И СВАРКИ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Полотнища (плоские секции). Их детали собираются на сборочных плитах (стендах). Детали перед сборкой должны проходить прав-

ку. После выставления зазора между деталями, прихватки и приварки выводных планок производится автоматическая сварка под флюсом стыков и пазов на проход. Она для толщин в диапазоне 4,0...18,0 мм может быть двухсторонней без разделки кромок. Этот способ требует кантовки полотнища после выполнения первого шва, что увеличивает трудоемкость изготовления. Предпочтительной является односторонняя сварка с одновременным формированием шва с двух сторон. При обоих способах необходимо плотное прижатие полотна к плите (стенду), которое может осуществляться различными способами. Получили распространение поточные линии для сборки и сварки полотнищ. Прижим на них осуществляется с помощью электромагнита, а формирование обратного усиления при сварке за один проход обеспечивается флюсо-медной подкладкой, помещаемой в стенде линии.

После сварки полотнища на нем устанавливается набор. Если набор имеет два направления, то чаще применяется раздельная сборка и сварка. При этом сначала устанавливается и приваривается продольный набор, а затем, после установки поперечного набора, сваривают вертикальные швы, соединяющие продольный набор с поперечным, и только после этого его приваривают к полотнищу ячейковым способом. В ряде случаев выставляется сразу продольный и поперечный набор, варятся соединительные вертикальные швы, а затем клетки набора привариваются к настилу ячейковым способом (рис. 7.8).

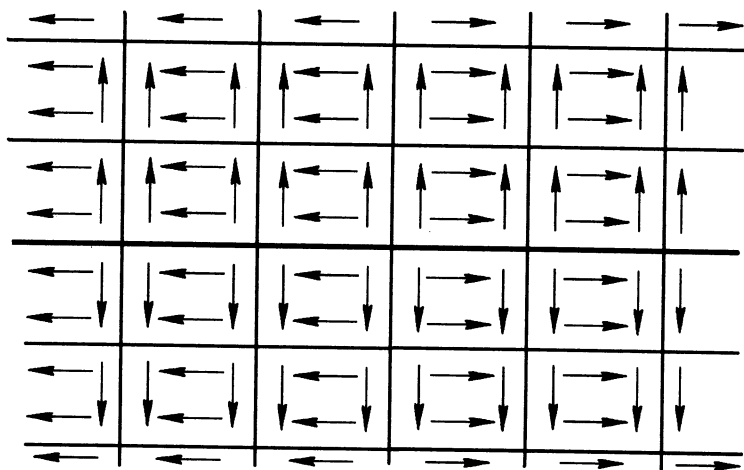


Рис. 7.8. Порядок приварки набора к обшивке (ячейковый способ)

Сварка ведется несколькими сварщиками одновременно. Применяется либо ручная сварка, либо полуавтоматическая в CO_2 (чаще всего порошковой проволокой).

При сварке на сборочных плитах полотнище перед сваркой швов после его прижима к плите прихватывается по контуру к плите. Прихватки после сварки срубаются, освобождая полотнище для кантовки. После кантовки производится строжка корня шва (при необходимости), осуществляется автоматическая сварка стыков и пазов, разметка, установка и приварка набора (кантовка может производиться и после установки и приварки набора).

Сварка секций с погибью. Криволинейные секции могут собираться и свариваться по двум вариантам. В первом базой для сборки является второе дно, на нем собирается и сваривается междудонный набор, после этого накладывается наружная обшивка, которая приваривается к набору. Во втором варианте сборка начинается на специальных постелях, имеющих лекала, повторяющие обвод секций. На лекала устанавливаются листы наружной обшивки, которые обжимаются и закрепляются к лекалам талрепами. Затем устанавливается и сваривается междудонный набор, к нему приваривается второе дно. Постель должна быть в достаточной мере жесткой, ее лекала должны иметь так называемый «развал», учитывающий деформации ее элементов во время сварки (это делается для уменьшения деформаций). Второе дно предварительно сваривается на плоском стенде, а затем обжимается по набору и приваривается к нему. Такой же обжим может быть применен и к наружной обшивке (по лекалам постели), если она состоит из листов толщиной до 10,0 мм. Все эти операции осуществляются, как правило, полуавтоматической сваркой в CO_2 (или смесях газов) с применением порошковой проволоки.

Сварка корпуса судна. Постройка цельносварных судов дает возможность перевести подавляющий объем работ со стапеля в цех, где все корпусные работы могут выполняться в более удобном положении с применением технологической оснастки и механизированных способов сборки и сварки, а следовательно, более качественно и в меньшие сроки. Секционное и блочное изготовление частей судна в цеховых условиях позволило значительно повысить степень их готовности в части прокладки трубопроводов, приварки фундаментов, монтажа части оборудования и т. д.

В отечественной практике применяют в основном два вида постройки судов на стапеле: секционный и блочный. Подавляющее большинство секций подается на стапель с технологическими припуска-

ми, что требует лишних операций по подгонке при сборке (газовая резка для удаления припусков). Более практичным является обработка секций и блоков в «чистый размер».

Подаваемые на стапель секции (блоки) устанавливают на специально оборудованные кильблоки, стапель-кондукторы, тележки, где их проверяют по расположению относительно базовых точек, плоскостей и причерчивают. После этого удаляются технологические припуски (желательно, для повышения качества реза, механизированной резкой). Припуски удаляют по наружной обшивке, настилам второго дна, палубе и по набору (стрингерам, ребрам жесткости). Одновременно с удалением припусков кромки стыкуемых узлов подготавливают под сварку в соответствии с принятыми способами сварки, руководствуясь действующей на заводе нормативной документацией.

При блочном методе постройки все секции, входящие в состав блока, собирают и сваривают вне стапеля. На стапеле должно быть обеспечено правильное положение стыкуемых блоков, сходимость одинаковых элементов и требуемые нормативной документацией зазоры. После установки двух блоков на тележки или кильблоки удаляют технологические припуски и подготавливают кромки под сварку. После прихватки сварку начинают со стороны набора последовательно от диаметральной плоскости к бортам по высоте — от кила к верхней палубе.

Наружную обшивку сваривают в первую очередь с двух сторон.

Настилы палуб и платформ в районе монтажного сечения сваривают в потолочном положении со стороны набора (ручная либо полуавтоматическая сварка) и автоматической сваркой с наружной стороны. После сварки настилов сваривают стыки набора, продольных переборок и ребер жесткости.

Сварку монтажных кольцевых стыков между блоками рекомендуется выполнять одновременно несколькими сварщиками по участкам симметрично относительно диаметральной плоскости и центральной горизонтальной оси. При этом устраняются перекосы и расхождения еще не заваренных участков стыков и уменьшаются деформации изгиба корпуса.

Главной задачей при сборке здесь является совпадение в одной плоскости стыкуемых кромок и равномерного зазора между стыкуемыми элементами. Задача эта решается применением прихваток (чаще всего) или гребенок, угольников с болтами, талрепов. При секционном способе постройка начинается с установки закладных днищевых секций на кильблоки или тележки в нужное по-

ложение; после удаления технологических припусков взаимное расположение секций обеспечивается с помощью стяжек. Для фиксации взаимного расположения секций используют прихватки или гребенки, временно привариваемые к наружной обшивке и удаляемые после сварки стыка. Рационально использовать полуавтоматическую сварку тонкой проволокой. В зависимости от толщины обшивки и вида разделки первый шов заваривается со стороны набора; корень шва с наружной стороны удаляется газовой (или электродуговой) строжкой, после чего наружная часть шва заваривается от диаметральной плоскости к бортам.

После сварки наружной обшивки заваривается настил второго дна, сначала в потолочном положении корень шва, со стороны набора, а затем с наружной стороны.

Стыки продольного набора и ребер жесткости свариваются в первую очередь. После чего приваривают к наружной обшивке и второму дну недозаваренные участки набора (полуавтоматическая сварка в CO_2 или ручная сварка).

Бортовые секции на оба борта устанавливают после сварки монтажного стыка днищевых секций. Зазор обеспечивается в соответствии с принятым способом сварки. Пазы сваривают полуавтоматической сваркой в CO_2 (чаще всего с применением порошковой проволоки малого диаметра). Сварка производится сначала со стороны набора, а затем с наружной стороны.

Сборка и сварка надстроек. Как правило, материалом для изготовления надстроек служат тонколистовая сталь либо алюминиевый сплав. Их основными элементами являются тонколистовые полотноща, подкрепленные ребрами жесткости. При изготовлении надстроек из алюминиевых сплавов часто используют прессованные панели. В корпусном цехе на плоских стендах — листах — собирают и сваривают полотноща с ребрами жесткости.

Так изготавливают стенки и крышу надстройки и другие элементы конструкции. Способ сварки выбирается с учетом вида материала и толщины листов (чаще всего полуавтоматическая сварка в CO_2 или в инертном газе соответственно для стали и алюминиевого сплава).

Технология сборки и сварки надстройки зависит от того, входит или не входит в состав надстройки часть палубы, на которой она размещается. Если палуба входит в состав надстройки, то сборка начинается с укладки на стенд листов, входящих в эту часть палубы. После монтажа объема всей надстройки в этом случае на стапеле монтажные стыки и пазы палубы свариваются в потолочном положении со

стороны набора полуавтоматом либо вручную, с наружной стороны — автоматом под флюсом.

Если же палуба не входит в состав надстройки, то ее сборку начинают на крыше верхнего яруса надстройки, устанавливая на ней стенки, переборки, выгородки и другие узлы.

Стальная надстройка приваривается к палубе непосредственно (полуавтоматической либо ручной сваркой), а надстройка из алюминиевых сплавов — через биметаллические переходники.

8. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ СТАЛЕЙ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

8.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СТАЛЕЙ ЭТОЙ ГРУППЫ

Широкое применение в судостроении в настоящее время имеют стали повышенной прочности. Обычно это стали перлитного класса с комплексной системой легирования. Применение таких сталей для корпусостроения диктуется снижением массы конструкции корпуса за счет уменьшения толщин его элементов. Наряду с этими материалами находят применение и стали со специальными свойствами; они разнообразны по своему химическому составу в зависимости от назначения. Эти стали могут быть теплоустойчивыми, жаропрочными, жаростойкими, коррозионностойкими, немагнитными и т. д. Они идут на изготовление атомных реакторов, паровых котлов, паропроизводящей аппаратуры, различного рода арматуры, трубопроводов и пр.

Увеличенное содержание легирующих элементов, как каждого в отдельности, так и суммарного, увеличение в ряде случаев содержания углерода в стали придает им повышенную чувствительность к тепловому воздействию термического цикла сварки. При сварке сталей перлитного (как и мартенситного) классов характерно образование в металле шва и ЗТВ хрупких закалочных структур типа мартенсита, что увеличивает возможность появления в нем холодных трещин. Для сталей высоколегированных (аустенитного и ферритного классов) при сварке характерна потеря их первичных свойств (коррозионной стойкости, немагнитности) в шве и ЗТВ.

Чувствительность к воздействию термического цикла сварки во многом зависит от структурного класса данной стали. Классы эти определяются структурой металла, получающейся при его охлаждении в определенных условиях. Они различаются как перлитный, мартенситный, аустенитный, ферритный и карбидный.

Так, к перлитному классу сталей относятся корпусные высокопрочные стали марки АБ. Эти стали имеют предел текучести от 390 МПа (сталь АБ) до ~1000 МПа (сталь АБ6А), комплексное легирование (Cr, Ni, Mo, V) при низком содержании углерода, что при

сохранении высоких прочностных и пластических характеристик способствует хорошей свариваемости; поставляются в толщинах 10...40 (сталь АБ) — 130 мм (сталь АБ2А). Они широко применяются в промышленности от корпусов атомных ледоколов и глубоководных аппаратов до водоводов спиральных камер уникальных гидротурбин.

Для целей атомной энергетики в России разработан ряд марок теплоустойчивых хорошо свариваемых сталей систем легирования Cr-Mo-V и Cr-Ni-Mo-V. Эти стали по своим физико-механическим свойствам и эксплуатационным характеристикам превосходят зарубежные стали такого назначения. Химический состав и механические свойства некоторых марок сталей повышенной прочности приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1
Свойства некоторых марок конструкционных сталей повышенной прочности

Марка стали	Химсостав, %						Примечание
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	
				не более			
12Г2СМФ	0,09–0,15	0,4–0,7	1,3–1,7	–	–	–	0,07–0,15% V 0,25% Mo
40	0,37–0,45	0,17–0,37	0,5–0,8	–	–	–	–
30ХГСА	0,28–0,31	0,9–1,2	0,8–1,1	0,8–1,1	–	≤ 0,2	≤ 0,25% Ni ≤ 0,025% S и P
14Х2ГМ	0,1–0,16	0,17–0,37	0,9–1,2	1,3–1,7	До 0,9	< 0,9	0,4–0,5% Mo
40ХФД	0,37–0,44	0,17–0,37	0,5–0,8	0,8–1,1	–	–	0,1–0,2% V

Механические свойства

Марка стали	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCV ⁻⁴⁰ , МДж/м ²	Примечание
	не менее					
12Г2СМФ	600	700	15	–	0,40	KCV свойства ниже –40 °С после закалки и отпуска
40	340	580	19	45	0,60	После нормализации
30ХГСА	1000	1100	9	45	0,5	Закалка + отпуск при 500 °С
14Х2ГМ	588	686	16	–	0,4	KCV при $\delta = 24$

8.2. ОСОБЕННОСТИ СВАРИВАЕМОСТИ СТАЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ ПЕРЛИТНОГО И МАРТЕНСИТНОГО КЛАССОВ

Представителями сталей перлитного класса являются конструкционные стали с повышенным содержанием углерода типа 40Х, 35ХГСА и др., а также низко- и среднелегированные стали 12ХМФ, 12Х15МА, 12Х1МФ и др. К этому же классу относятся микролегированные стали марок 10Г2ФР, 12Г2СМФ, 12ГН2МФА и др. Для этих сталей технологическая и эксплуатационная прочность зависят от вторичной структуры, образующейся в металле шва и ЗТВ под воздействием термического цикла сварки.

Конечная структура стали зависит от температуры начала распада аустенита и определяется скоростью его охлаждения, так как процесс этот имеет диффузионную природу. Образуются продукты распада и полураспада аустенита: перлит, сорбит, троостит и бейнит, — представляющие собой смесь ферритной и цементитной фаз, которые различаются между собой прежде всего степенью дисперсности смеси. По мере увеличения скорости охлаждения наблюдается плавный переход от одного типа структуры к другому с изменением механических свойств металла.

При высоких скоростях охлаждения образуется мартенсит, который представляет собой пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе; он имеет тот же состав, что и аустенит, но его кристаллическая решетка перестроена в результате быстрого бездиффузионного превращения. Мартенсит образуется с объемными изменениями, и его пластины (иглы) имеют высокую твердость. Поэтому основной опасностью при сварке сталей этого класса является чувствительность к появлению холодных трещин в металле шва и ЗТВ. На их образование влияют три основных фактора.

Первым, как уже было сказано, являются структурные превращения. Наиболее благоприятной структурой, с этой точки зрения, является перлит (сорбит). Характер распада аустенита в зависимости от температурно-временных условий определяется диаграммами его изотермического распада (распада при фиксированных постоянных температурах). При сварке металл от температуры плавления охлаждается непрерывно, поэтому для определения его структуры и свойств лучше пользоваться диаграммами термокинетического распада аустенита, т. е. распада, протекающего при его непрерывном охлаждении. На рис. 8.1 приведена такая диаграмма для стали с содержанием ~0,2% С и ~2% Мп. На нее нанесены кривые скоростей охлаждения, которые, пересекая кривые начала и конца распада аустенита, опреде-

ляют области с различными структурами и механическими свойствами (определяемой здесь твердостью металла по Виккерсу). Для прохождения перлитного превращения необходимо, чтобы кривая охлаждения была правее кривой HV 490, так как в противном случае структура будет полностью мартенситной. Такая структура будет иметь высокую твердость и хрупкость. Для определения скорости охлаждения металла ЗТВ на конкретно выбранном режиме производят ее вычисление по формуле (для случая сварки пластин встык)

$$W_m = \frac{dT}{dt} = -2\pi\lambda c\gamma S \frac{(T - T_0)^3}{\left(\frac{q}{vS}\right)^2}$$

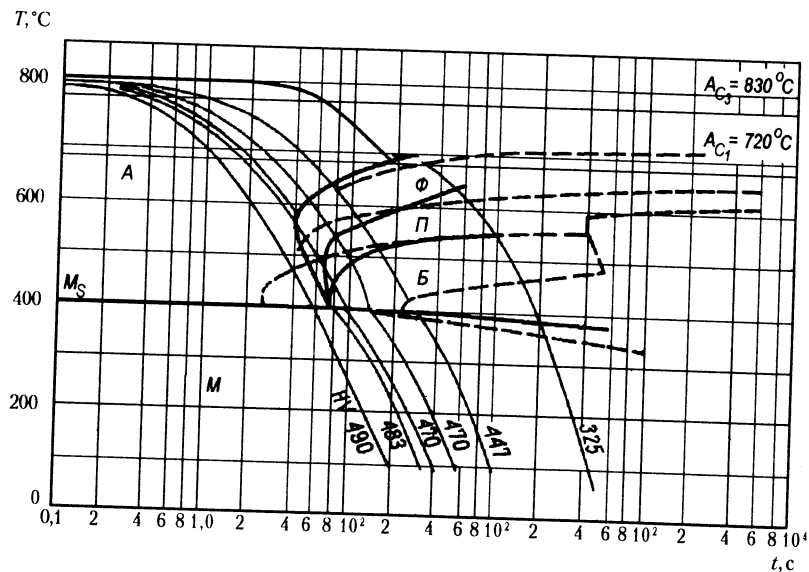


Рис. 8.1. Диаграмма термокинетического распада аустенита низколегированной стали типа 25Г2

Если полученные значения скорости охлаждения выше критической скорости по термокинетической диаграмме данной стали, то необходимо принимать меры по ее уменьшению. Этими мерами могут быть увеличение погонной энергии $\left(\frac{q}{vS}\right)$ или введение подогрева в той или иной форме (увеличение T_0).

Для определения параметров режима сварки можно использовать и диаграммы изотермического распада аустенита данной марки стали, однако, простое наложение на них кривых охлаждения дает определенную ошибку. Здесь нужно учитывать непрерывность охлаждения металла, характерную для условий сварки. Экспериментально было показано, что при непрерывном охлаждении температура наименьшей устойчивости аустенита T_{\min} снижается на 55 °С по сравнению с изотермическими условиями, а наименьшее время до начала распада аустенита t_{\min} примерно в 1,5 раза больше найденного по диаграмме изотермического распада. В ЗТВ под влиянием высокой температуры растет зерно, и это повышает устойчивость аустенита примерно в 2 раза ($1,5 \cdot 2 = 3$). Здесь величину t_{\min} берут из диаграммы изотермического распада конкретной марки стали. Учитывая эти поправки, можно вычислить критическую скорость охлаждения, при которой перлитное превращение с учетом непрерывного охлаждения пройдет полностью (или частично):

$$W_{кр} = \frac{T_{A_1} - (T_{\min} - 55)}{3t_{\min}}$$

где T_{A_1} — температура первой критической точки полиморфного превращения A_{c_1} .

Очевидно, что для обеспечения хороших свойств сварного соединения (и наличия в металле ЗТВ перлитной структуры или структур полураспада) необходимо соблюдение соотношения

$$W_m \leq W_{кр}$$

Склонность данной марки стали к закалке (а значит и ее чувствительности к термическому циклу сварки) определяется содержанием в ней углерода и суммы легирующих элементов. Все эти элементы увеличивают инкубационный период и замедляют распад аустенита. Влияние легирующих элементов на закаливаемость стали с помощью соответствующих коэффициентов с некоторым приближением можно привести к аналогичному влиянию углерода, который наиболее сильно влияет на закаливаемость стали.

Для конструкционных высокопрочных судостроительных сталей с пределом текучести 600...1000 МПа может быть применена формула для расчета такого химического углеродного эквивалента:

$$C_x = C + \frac{Si}{30} + \frac{(Mn+Cr)}{30} + \frac{(Ni+Cu)}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10}^*$$

* Данные по материалам ЦНИИ КМ «Прометей».

Значение углеродного (химического) эквивалента, рассчитанного по этой формуле, для отечественных высокопрочных, конструкционных сталей составляет 0,32...0,35, тогда как у сопоставимых марок американских сталей это значение выше ($\text{HY100 } C_{\text{экв}} = 0,42$). Это и есть второй способ определения склонности стали к закалке под действием термического цикла. Существует критическое значение углеродистого эквивалента, до достижения которого стали могут свариваться без образования хрупких структур, и их сопротивляемость к образованию холодных трещин достаточно высока. При этом получение нужных скоростей охлаждения можно достигнуть регулированием параметров режима сварки без применения подогрева. Если значения $C_{\text{экв}}$ больше критического, то для получения благоприятных скоростей охлаждения металла необходимо введение подогрева.

В случае необходимости подогрева металла перед сваркой его температура может быть выбрана с учетом углеродного (химического) эквивалента и свариваемой толщины C_p . По этой методике сначала определяют общий эквивалент

$$|C|_{\text{экв}} = |C|_x + |C|_p,$$

где C_x — химический углеродный эквивалент; C_p — размерный эквивалент:

$$|C|_p = 0,005S|C|_x.$$

Здесь размерный эквивалент определяет жесткость сварного узла (толщину свариваемой детали).

Отсюда

$$|C|_{\text{экв}} = |C|_x (1 + 0,005S).$$

После определения общего эквивалента находят необходимую температуру подогрева

$$T_{\text{п}} = 350 \sqrt{|C|_{\text{экв}} - 0,25}. \quad (8.1)$$

Экспериментальные данные и производственный опыт показывают, что если $C_{\text{экв}} < 0,45\%$, то данная сталь может свариваться без предварительного подогрева по обычной технологии, если же $C_{\text{экв}} > 0,45\%$, то необходим подогрев. При этом его температура тем выше, чем больше величина $C_{\text{экв}}$.

Одним из основных факторов повышения сопротивляемости образованию холодных трещин при сварке современных высокопрочных сталей является снижение содержания углерода в основном металле. Во время сварки этих сталей при разнице содержания углерода в 0,03% стойкость сварных соединений к образованию холодных трещин значительно изменяется.

Исследованиями свариваемости высокопрочных хромоникельмолибденовых сталей было определено, что при содержании углерода 0,14% фиксируются поперечные холодные трещины. Металлографические исследования обнаруживают в сварном соединении структуру бейнита с большим количеством цементита по границам колоний и реек мартенсита. Наблюдаются также выделения цементита отпуски, что усугубляет охрупчивание металла ЗТВ при сварке. Для указанного класса сталей суммарное влияние легирующих элементов на свариваемость рассчитывается по формуле

$$\sum L_s = \frac{(\text{Mn} + \text{Cr})}{20} + \frac{\text{Si}}{30} + \frac{(\text{Ni} + \text{Cu})}{60} + \frac{\text{Mo}}{15} + \frac{V}{10}^*$$

Влияние легирующих элементов в зависимости от содержания углерода в сталях этого класса на появление холодных трещин в сварных соединениях при автоматической сварке под флюсом при содержании водорода в металле шва $1,5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ показано на рис. 8.2. Из графика видно, что уверенно обеспечивать хорошую свариваемость этих сталей можно при низком содержании углерода ($\leq 0,1\%$). В этом случае (при низком содержании водорода в металле шва) без подогрева можно сваривать стали с пределом текучести до 700 МПа в толщинах до 50 мм.

Кроме углерода на образование холодных трещин в сварном соединении влияет водород, недаром его содержание в металле шва, как видно из вышеизложенного, пытаются ограничить. Водород, находящийся в стали, дополнительно снижает работу ее разрушения, охрупчивает металл и тем самым способствует образованию трещин. Диффузионно-подвижный водород накапливается в несплошностях металла. Из атомарного он ассоциирует в молекулярный, постепенно увеличивая свое давление в несплошностях металла, что отрицательно сказывается на сопротивляемости стали к разрушениям. Поэтому применяется ряд технологических мер для уменьшения опасности попадания из влаги водорода в реакционную зону сварки, создаются

* Данные по материалам ЦНИИ КМ «Прометей».

специальные низководородистые электроды, устанавливаются нормы допустимого содержания водорода в металле шва в зависимости от его химического состава.

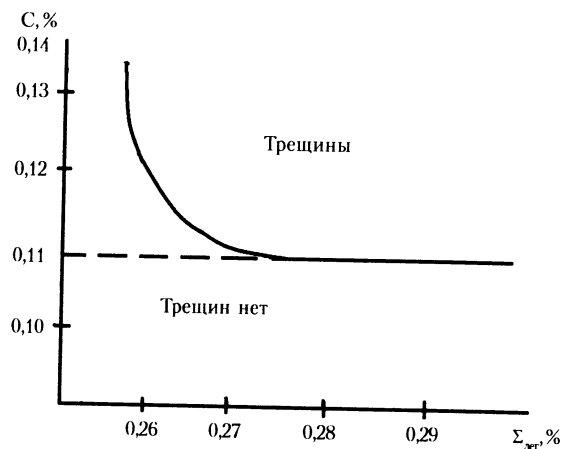


Рис. 8.2. Влияние содержания углерода на склонность хромоникельмолибденовых сталей к образованию холодных трещин при сварке

Установлено, что чем выше углеродный эквивалент металла, тем меньшее содержание водорода допустимо в металле шва (рис. 8.3). Именно поэтому при сварке высокопрочных сталей содержание водорода в металле шва ограничивают в пределах $1,5 \dots 2,5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$.

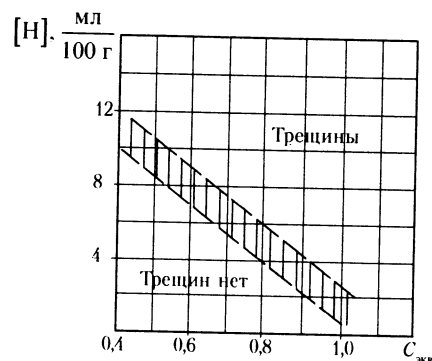


Рис. 8.3. Совместное влияние углеродного эквивалента и содержания водорода на образование холодных трещин в металле шва

Третьим фактором, влияющим на образование холодных трещин в сварных соединениях, является их напряженно-деформированное состояние. Здесь влияние могут оказывать и остаточные сварочные напряжения, и, особенно, реактивные напряжения (возникающие в заделанных элементах конструкции, когда их перемещения при местном сварочном нагреве практически запрещены). Этот фактор определенным образом отражен в формуле результирующего углеродного эквивалента через толщину свариваемого элемента (с увеличением толщины элемента увеличивается жесткость узла конструкции). Существуют формулы, в которых при оценке склонности к трещинообразованию отражены химический состав стали, свариваемая толщина и содержание водорода (см. разд. 7).

При сварке высокопрочных сталей особое значение приобретает концентрация напряжений в местах резкого изменения сечения элементов конструкции. Поэтому здесь необходимо особое отношение к оформлению переходов усиления сварного шва к основному металлу (достаточно большой радиус перехода). С учетом изложенного, и технология сварки высокопрочных сталей перлитного класса имеет свои особенности.

Если значение углеродного эквивалента $C_{эж} < 0,45$, то подогрев при сварке не нужен и технология в ее режимной части практически не отличается от таковой для низкоуглеродистых сталей. При более высоком значении углеродного эквивалента необходимо введение подогрева. Его температура в зависимости от марки свариваемой стали рассчитывается по формуле (8.1).

Выполнять подогрев можно как предварительный или сопутствующий. Обычно температура подогрева лежит в диапазоне $100 \dots 200 \text{ }^\circ\text{C}$. При высоком углеродном эквиваленте подогрев может достигать $300 \dots 500 \text{ }^\circ\text{C}$. Осуществляется подогрев в муфельных печах (для относительно небольших по габаритам узлов), индукторами тока промышленной частоты, специальными гибкими лентами со спиралью для электрического подогрева, газовыми горелками с насадками, обеспечивающими подогрев за счет инфракрасного облучения. Можно вести подогрев и открытым пламенем газовой горелки, однако это наименее желательный способ, так как он не исключает получения прижогов на поверхности основного металла.

Выборную температуру подогрева можно проверить, рассчитав при конкретно выбранном режиме скорость охлаждения металла в ЗТВ и сориентировавшись по диаграмме анизотермического распада аустенита с получаемыми структурами. Если они неблагоприятны, то корректируются либо режимы сварки, либо температура подогрева.

Применяемые диапазоны погонных энергий при различных способах сварки перлитных сталей колеблются в пределах:

ручная дуговая сварка	– 4...40 кДж/см;
автоматическая под флюсом и в защитных газах	– 20...100 кДж/см;
ЭШС	– 120...420 кДж/см.

Если сварное соединение выполняется многопроходной сваркой (ручной или автоматической), то скорость охлаждения металла шва и ЗТВ можно в определенных пределах регулировать изменением числа проходов и последовательности их наложения. Возможны два случая.

1. Проход выполняют на всю длину шва. Здесь к моменту наложения следующего прохода начало первого успевает остыть (скорость охлаждения металла в ЗТВ относительно велика). Режим каждого последующего прохода выбирается такой, чтобы температура нагрева нижележащего слоя не была выше T_d ; при таких температурах происходит отпуск закаленного металла в течение времени $t_{отп}$. Последний проход преследует цель отпуска металла шва — его следует выполнять так, чтобы температура нагрева основного металла была невелика. Такой слой получил название «отжигающий валик».
2. Сварку выполняют короткими швами. В этом случае каждый последующий слой накладывается на еще не остывший металл, температура которого близка к температуре подогрева. Такой вариант исключает закалку металла. Поддерживаемая при такой технологии температура объемов металла ЗТВ носит название температуры автоподогрева. Такое состояние реализуется при многопроходной сварке больших толщин блоками, каскадом или горкой.

Длину одновременно заваренных участков, при которой выполняется это условие, можно рассчитать по формулам теории распространения теплоты при сварке.

Так, длину участка, при которой металл ЗТВ после сварки 1-го слоя охладится до температуры T_b , определяют по формуле

$$l = \frac{k_r q^2}{4\pi\lambda c\gamma S^2 v_{св} (T_b - T_0)^2},$$

где k_r — коэффициент горения дуги (0,6...0,9); λ — коэффициент теплопроводности, Дж/см·с·°С; $c\gamma$ — объемная теплоемкость, Дж/°С·см³;

S — толщина свариваемого металла, см; $v_{св}$ — скорость сварки, см/с; T_0 — температура изделия перед сваркой, °С.

Можно определить и время сварки участка выбранной протяженности

$$t_{св} = \frac{l}{v_{св} k_r}.$$

Большинство марочных составов сталей типа АБ дают углеродный эквивалент < 0,45 и обладают хорошей свариваемостью, которая оценивается прямым способом при сварке проб «Теккен» и жестких проб ЦНИИ ТС (с размерами и толщиной, соответствующими фрагменту реальной конструкции корпуса). Для изготовления корпусных конструкций из данной марки стали допускаются технология и сварочные материалы, показавшие по результатам неразрушающего и разрушающего контроля отсутствие трещин. Стали с пределом текучести до 600 МПа (АБ-АБ2) свариваются без подогрева ручной, автоматической сваркой под флюсом и в смеси защитных газов с использованием низколегированных сварочных материалов. Металл шва, выполненный этими способами, имеет прочность, приближающуюся к прочности основного металла, и высокую ударную вязкость при отрицательных температурах. Структура стали после закалки и отпуска — сорбит. Результаты проведенных испытаний показали соответствие сталей и сварочных материалов требованиям Российского Морского Регистра Судоходства и международных классификационных обществ.

Корпусные стали с пределом текучести до 1000 МПа (АБ7) имеют углеродный эквивалент, не превышающий предельное значение (0,45), обладают также хорошей свариваемостью при довольно умеренном подогреве (50...150 °С). Величина подогрева зависит от предела текучести стали и содержания водорода в металле шва.

8.3. ВЫБОР СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

При сварке высокопрочных низколегированных сталей перлитного класса применяют обычно сварочные материалы, обеспечивающие перлитную структуру металла шва.

Химический состав сварочных материалов (электродных прутков, электродной или присадочной проволоки) для этого выбирается

той же системы легирования, что и основной металл, ограничивая содержание в нем углерода, серы и фосфора. Равнопрочность соединения при этом гарантируется созданием соответствующего сечения шва. При расчете химического состава шва (а значит и его механических свойств) обязательно учитывают подлегирование металла шва за счет доли участия в нем основного металла; эта доля колеблется в значительных пределах для разных способов сварки. Одинаковый структурный состав металла шва и основного металла при их примерно одинаковой прочности дает возможность применять автоматическую сварку с режимами, обеспечивающими достаточно большое сечение прохода. Это позволяет уменьшить количество проходов по сравнению с ручной сваркой.

Усиление шва (рис. 8.4, а) имеет небольшую величину (и при ней обеспечена равнопрочность). Как было сказано выше, склонность перлитного металла к образованию холодных трещин зависит (помимо структурного фактора) от содержания водорода в металле шва. Его содержание должно быть ограничено, что требует применения низководородистых электродов с покрытием вида Б. Перед употреблением электроды должны быть прокалены при температуре 350...500 °С.

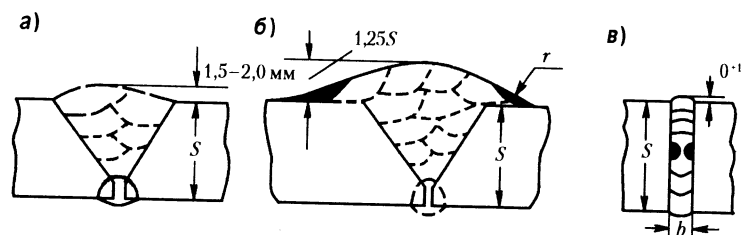


Рис. 8.4. Параметры геометрии сварных швов:

а – при сварке перлитными материалами; б – при сварке аустенитными материалами; в – при щелевой разделке

Применяя перлитные сварочные материалы, можно использовать не только ручную сварку покрытыми электродами, но и механизированную сварку под слоем флюса или в среде защитных газов. В этом случае для уменьшения содержания водорода требуется прокалка флюса при температуре 600...700 °С, а содержание влаги в защитном газе (углекислом, аргоне или смесях) ограничено весьма жесткими нормами.

Высокую технологическую прочность и работоспособность металла шва при сварке высокопрочных сталей перлитного класса можно

получить при содержании в нем комбинаций в определенных пределах следующих элементов: С, Si, Mn, Cr, Ni, V, Mo, Nb. При определенном количественном содержании этих элементов в металле шва его прочность $\sigma_{\text{в}}$ может колебаться в пределах 600...700 МПа в исходном состоянии после сварки и 850...1450 МПа после соответствующей термообработки.

Возможен и другой вариант – применение аустенитных сварочных материалов. Аустенит имеет более низкую прочность, и для получения равнопрочных сварных соединений приходится значительно увеличивать сечения сварных швов. Так, в некоторых случаях величина усиления стыковых швов может достигать $0,3S$ (рис. 8.4, б). Это приводит к двум следствиям:

- во-первых, резко увеличивается трудоемкость выполнения соединения, особенно учитывая то, что сечение прохода при многослойной сварке ограничено из-за опасения разбавления аустенитного металла шва чересчур большой долей основного перлитного металла;
- во-вторых, из-за относительно резкого сбега высокого усиления к основному металлу образуется геометрическая концентрация напряжений в этом районе (см. рис. 8.4, б), что может при эксплуатации конструкции привести к раннему появлению трещины. Поэтому требуется наложение специальных, так называемых «галтельных» валиков для уменьшения геометрической концентрации напряжений в этом месте, либо применение механической обработки (фрезерование), обеспечивающей галтель в месте перехода с радиусом не менее 12 мм.

Положительными сторонами применения аустенитных материалов является их меньшая чувствительность к водороду. Водород хорошо растворяется в аустените, а его диффузионная подвижность в кристаллической решетке ограничена – это значительно уменьшает поступление водорода из шва в ЗТВ, поэтому нет строгих требований к его нормированию в шве. Кроме этого, аустенитный шов, по сравнению с перлитным, имеет значительно большую пластичность, что весьма полезно при эксплуатационных перегрузках. Конкретные марки электродов и системы флюс-проволока выбирают в зависимости от состава основного металла (марки стали), руководствуясь нормативной документацией.

Как видно из изложенного, одной из основных трудностей при сварке рассматриваемых сталей является опасность получения мартенситных структур. Если избежать их за счет технологических приемов не удастся, то приходится применять термическую обработку

конструкции после сварки. Эту операцию желательно проводить сразу же после сварки, пока температура в районе шва не упала ниже температуры мартенситного превращения, характерной для данной марки стали.

Распространенной (после сварочной) термообработкой является отпуск с нагревом 600...700 °С и выдержкой около двух часов. Такой отпуск способствует переводу структуры в более равновесное состояние (мартенсита в сорбит), снятию остаточных сварочных напряжений и частичному удалению из сварного соединения диффузионно-подвижного водорода. Этой термообработке обязательно подвергаются сварные конструкции ответственного назначения (паропроводы высокого давления, корпуса атомных реакторов, паропроизводящая аппаратура, котлы и т. д.). Термообработка может быть общей (иногда в специально изготовленных печах) либо местной (индукционный нагрев в районе швов). Сварные соединения, выполненные аустенитными материалами, как правило, после сварочной термообработке не подвергаются.

8.4. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ

Ручная сварка

Для сварки сталей 40 и 45 и легированных сталей средней прочности можно использовать перлитные электроды УОНИ 13/55, УОНИ 13/65 и УОНИ 13/85 или других марок в соответствии с ГОСТ 10052-75. Эти электроды позволяют получить весьма пластичный металл шва с высокой стойкостью против образования холодных трещин. Для сталей более высокой прочности, работающих в условиях сложных эксплуатационных нагрузок, рекомендуется применять аустенитные электроды с большим запасом аустенитности (например, Э-08Х15Н25М6АГ2). Не рекомендуется применять электроды, у которых металлический стержень изготовлен из проволок типа Св-06Х19Н9Т, Св-13Х25Н18 и им подобных, ибо из-за перемешивания с основным перлитным металлом металл шва теряет аустенитную структуру и становится хрупким.

Автоматическая сварка под флюсом

Характерно, что при высокой прочности сталей (при относительно высоком содержании в них углерода) их сварка под кислыми

флюсами ОСЦ-45 и АН-348 дает большую чувствительность к холодным и горячим трещинам. Для улучшения свойств металла шва в ряде случаев используют основные флюсы марок АН-26, АН-20, 48-ОФ-10; при этом обеспечивается высокая чистота металла шва по сере и окисным включениям (электродные проволоки Св-08А, Св-10ГН, Св-08ГСМТ).

Флюс перед употреблением рекомендуется прокалывать для удаления влаги при температуре 300...350 °С с выдержкой 2...3 ч. Подогрев при сварке большинства сталей не производится. Лишь при сварке жестких узлов конструкций с большой толщиной элементов подогрев следует вводить в технологический процесс (250...300 °С). При необходимости после сварки рекомендуется общий отпуск при температуре ~600 °С.

Применение глубокоаустенитных проволок при сварке сталей 30ХГСА и 30ХГСНА обеспечивает высокую пластичность и работоспособность соединений (например, проволока Св-10Х15Н25АМ6, флюс 48-ОФ-6). Конструктивные элементы разделки кромок, как правило, практически не отличаются от таковых по сравнению с низколегированными сталями. Сварку под флюсом АН-348А можно производить на постоянном или переменном токе, а под флюсом АН-15 — на постоянном токе. Режимы сварки выбираются в зависимости от свариваемой толщины, диаметра электродной проволоки и ее свойств (аустенит, перлит).

Сварка в защитных газах

Этот процесс находит широкое применение при изготовлении разнообразных конструкций из сталей рассматриваемого класса. Процесс легко механизуется и применяется в модификациях — автоматический и полуавтоматический. При этом в качестве защитных газов могут применяться как инертные, так и активные газы и их смеси в разнообразных сочетаниях. В инертных газах сварка может производиться как плавящимся, так и неплавящимся электродом. При применении активных газов — только плавящимся электродом.

Наиболее универсальным способом является полуавтоматическая сварка тонкой электродной проволокой 0,8...2,0 мм в среде углекислого газа. Этот способ позволяет производить сварку во всех пространственных положениях, обладает относительной дешевизной (из-за низкой стоимости и недефицитности углекислого газа) и обеспечивает (при правильном выборе состава электродной проволоки) требуемые свойства металла шва. Здесь так же, как и при сварке низ-

колегированных сталей, в результате диссоциации в дуге молекул газа и воды в газовой фазе над зеркалом жидкого металла образуется избыточное парциальное давление кислорода и водорода (P_{O_2} и P_{H_2}), что приводит к образованию на поверхности сварочной ванны слоя жидкого металла, обогащенного кислородом. Этот слой служит своеобразным барьером для водорода, ограничивая его доступ в сварочную ванну. В то же время свободный кислород приводит к окислению легирующих элементов ванны, что требует применения сварочных проволок с повышенным содержанием в них таких элементов раскислителей как марганец и кремний (Св-08Г2С, Св-08ГСМТ, Св-08ХГСМА, Св-08ХГСМФА и др.).

При наличии в сварочной ванне некоторого количества кислорода, относительно высоком содержании в стали углерода и отсутствии (или недостатке) других раскислителей при кристаллизации ванны продолжение реакции образования СО может вызвать кипение ванны и образование пор. Для подавления этой реакции следует через проволоку вводить достаточное количество раскислителей (марганца и кремния).

Если защитной средой является аргон и раскислители отсутствуют, то повышение окисленности металла ванны может быть достигнуто за счет добавки к аргону до 5% кислорода или 25% углекислого газа с кислородом (до 5%). При этом процесс окисления углерода интенсифицируется в области более высоких температур, что приводит к его угасанию при начале кристаллизации. При сварке в CO_2 следует контролировать содержание влаги и водяных паров, так как их повышенное содержание даже при хорошей защите приводит к образованию пор.

При сварке высокопрочных сталей, как и при сварке низкоуглеродистых и низколегированных, все большее применение находит при полуавтоматической сварке порошковая проволока малого диаметра в среде смеси инертных и активных газов. Эта проволока (при соответствующем легировании) позволяет получить металл шва с повышенной ударной вязкостью, обеспечить повышение производительности за счет возможности увеличения сварочных токов (на 30...70%), значительно уменьшить коэффициент разбрызгивания, улучшить формирование шва и дает возможность производить сварку во всех пространственных положениях.

Особо необходимо отметить, что для сталей типа АБ разработаны и применяются низколегированные и аустенитные сварочные материалы. Для сталей с $\sigma_{0,2} \leq 600$ МПа, свариваемых, как правило, без подогрева

низколегированными перлитными сварочными материалами, с пониженным содержанием серы и фосфора при относительно малом содержании углерода (0,04...0,06%) применяются: для ручной сварки электроды марок 48ХН-5, 48ХН-4 с покрытием основного типа; для автоматической сварки — низколегированная проволока Св-04НЗГМТА и Св-04Н2ГТА; при сварке в смеси защитных газов $Ar + CO_2$ — проволока Св-04Н2ГСТА и Св-04НЗГСМТА.

Стали с более высоким содержанием углерода (высокопрочная сталь типа 14ХН2МДА) при применении низколегированных сварочных материалов требуют подогрева. Чтобы его избежать, предпочтение отдают преимущественно аустенитным сварочным материалам с достаточно большим запасом аустенитности. Для ручной сварки — электроды ЭА-981/15 и аустенитно-ферритные ЭА48М/22, высокопрочная проволока 10Х19Н23Г2М5 — для сварки под флюсом, аустенитная проволока Св-10Х19Н11М4Ф — для сварки в защитном газе без сопутствующего или предварительного подогрева.

Сварка неплавящимся электродом осуществляется на постоянном токе прямой полярности. При этом применяют вольфрамовые прутки, лантанированный вольфрам ВЛ-2 и ВЛ-10 или итрированный вольфрам СВИ-1, поставляемые по ГОСТ 23949-89.

В качестве защитных газов может применяться аргон высшего и первого состава (ГОСТ 10157-79) или гелий марок А, Б или В (ГОСТ 20461-75). Возможно использование смесей (например, 75% $Ar + 25\%$ He). Это улучшает формирование швов, а добавка до 1% кислорода повышает устойчивость горения дуги на переменном токе и уменьшает опасность появления пористости в шве.

При сварке в таком активном защитном газе как углекислый, представляющем собой сильный окислитель, в проволоку, кроме легирующих элементов, обязательно вводят раскислители (кремний, марганец, титан). Примерами таких проволок служат Св-08Г2С, Св-08ГСМТ, Св-08ХГСМА, Св-08ХГСМФА и др.

Для сварки высокопрочных среднелегированных сталей часто (особенно при сварке в смеси газов) используют низкоуглеродистые легированные и аустенитные высоколегированные проволоки (например, Св-10ХГСН2МТ, Св-03ХГН3МД, Св-08Х20Н9Г7Т, Св-10Х16Н25-АМ6, Св-Х21Н10Г6).

При сварке в инертных газах (как неплавящимся, так и плавящимся электродом) при свариваемых толщинах более 20 мм целесообразно применять щелевую разделку. В этом случае на свариваемые торцы по центру наплавляются валики, которые при сборке образуют фиксированный размер щели b (рис. 8.4, в). Такое соединение выпол-

няется более мягкой проволокой. При этом не требуется развитого усиления шва для компенсации меньшей прочности, так как равнопрочность соединения обеспечивается за счет контактного упрочнения мягкой прослойки, степень которого зависит от разности прочности основного металла и металла шва, а также от геометрических параметров мягкой прослойки $\chi = \frac{b}{S}$. Относительно небольшие размеры щели обеспечивают провар обеих кромок при выполнении каждого прохода (иногда применяется поперечное колебание электрода или сварочной дуги за счет переменных электромагнитных полей).

С увеличением относительной толщины мягкой прослойки χ уменьшается эффект контактного упрочнения металла шва. В области $0,1 < \chi < 1$ предел прочности для сварных соединений компактного сечения (сплошное сечение с отношением сторон, близким к единице) оказывается выше предела прочности металла мягкой прослойки:

$$\sigma_{\text{в}} = \sigma_{\text{н}}^{\text{н.п}} \left(1 + \frac{1}{3\sqrt{3}\chi} \right).$$

При больших толщинах свариваемых деталей целесообразно применять ЭШС. ГОСТ 15164-69 регламентирует основные типы и конструктивные элементы сварных соединений и швов, применяемые при ЭШС. Применяются флюсы марок АН-8 и АН-22. Марки проволоки связаны с требованиями, предъявляемыми к металлу шва. В зависимости от состава свариваемой стали это могут быть, например, Св-08ХГ2С, Св-08ГСМТ, Св-18ХМА, Св-10Х5М и др. Из этих же сталей могут быть изготовлены плавящиеся мундштуки и пластинчатые электроды. При ЭШС подогрев часто не применяется с учетом высокого значения погонных энергий процесса.

В ряде случаев могут возникать горячие трещины в металле шва и холодные трещины (отколы) в металле ЗТВ (особенно в местах начала шва и перерыва процесса). Регулируя режимы так, чтобы получить неглубокую и широкую ванну, удается избавиться от горячих трещин. Что касается холодных трещин, то опасность их появления при жестком закреплении кромок удается уменьшить, применив предварительный подогрев до 150...200 °С.

Опасным является рост зерна в ЗТВ, что вызвано достаточно длительным пребыванием металла этой зоны при высоких температурах. Это ведет к падению ударной вязкости и возможности охрупчивания металла. Поэтому (особенно для сталей с повышенным содержанием углерода) сварные соединения после их выполнения должны

подвергаться термообработке с целью восстановления механических свойств. К таким сталям относятся и теплоустойчивые стали, применяемые для изготовления корпусов атомных реакторов.

8.5. СВАРИВАЕМОСТЬ И ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Высокохромистые стали

Система легирования Fe-Cr-C является весьма интересной и послужила для создания целого семейства сталей различных структурных классов, помимо высокой прочности обладающих весьма значительной коррозионной стойкостью. Это тем более ценное свойство, что достигается оно за счет легирования стали дешевым и малодифцитным хромом. Высокая коррозионная стойкость хромистых сталей объясняется окисной пленкой, приводящей к пассивации ее поверхности. В зависимости от содержания хрома коррозионная стойкость стали сохраняется до температур 600...800 °С, а с увеличением его содержания обеспечивается окалиностойкость при высоких температурах (800...1100 °С).

Структура хромистых сталей может быть различна, что определяется процентным содержанием в них углерода и хрома. В зависимости от развития структурных превращений хромистые стали подразделяются на 3 группы: с полным $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращением; с частичным $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращением; без превращения.

Стали первой группы имеют мартенситную структуру (20X13, 14X17H2 и др.), второй — мартенсито-ферритную структуру (12X13, 14X12B2MФ) и третьей — ферритную (12X17, 08X17Г). Свариваемость этих сталей тесно связана с их структурой. Наиболее затруднена сварка сталей М и М + Ф класса. Стали с мартенситной структурой при сварке в зоне и в шве (если химический состав шва подобен составу основного металла) закаляются на мартенсит. Такие швы обладают низкой деформационной способностью, что на последней стадии охлаждения (при $T \sim 100$ °С) может привести к образованию холодных трещин.

Большая, чем в ЗТВ, крупнозернистость металла шва также способствует образованию в нем холодных трещин; к интенсификации этого процесса приводит и увеличение жесткости закрепления при сварке. Для предотвращения образования холодных трещин обычно применяется подогрев и модифицирование металла шва.

Температура подогрева выбирается в зависимости от склонности стали к закалке и жесткости (толщины) свариваемых элементов изделия. Практически температура подогрева колеблется в интервале 100...250 °С. Верхний предел сопутствующего подогрева ограничен из-за опасности появления синеломкости металла. Однако любая температура подогрева не предупреждает распад по мартенситному механизму; металл ЗТВ имеет достаточно высокую твердость и низкую ударную вязкость. Это связано с высокими скоростями охлаждения даже при наличии подогрева. Поэтому сварные соединения после их выполнения должны подвергаться термообработке (высокому отпуску).

Наилучшими режимами термообработки являются или подступивание после сварки изделия примерно до 100 °С с выдержкой до двух часов (это необходимо для полного распада аустенита) с последующим нагревом до 700 °С и медленным охлаждением, или «отдых» после сварки в течение 10 ч, охлаждение до комнатной температуры с последующим высоким отпуском. Для обеспечения равнопрочности соединения отпуск после сварки рекомендуется давать при температуре примерно на 20 °С ниже температуры отпуска стальных заготовок до сварки.

Для сварки конструкций из М и М + Ф сталей применяют почти все разновидности сварки плавлением. Особое распространение получили ручная сварка покрытым электродом, автоматическая сварка под флюсом и сварка в защитных газах.

Наиболее часто для этих способов сварочные материалы (электроды, электродную и присадочные проволоки) выбирают с таким расчетом, чтобы получить металл того же химического состава, что и основной. В этом случае после последующей термообработки удается получить свойства сварного соединения, наиболее близкие к свойствам исходного металла. Если нет условий для такого усложнения технологии (сопутствующего подогрева и последующей термообработки), то следует изменить подход и выбрать сварочные материалы, обеспечивающие аустенитную или аустенитно-ферритную структуру металла шва. В этом случае отпадает необходимость в последующей термообработке, так как деформационная способность металла шва повышается.

Для ручной сварки покрытыми электродами в зависимости от марки свариваемой стали можно рекомендовать:

- для стали марок 08X13, 12X13 электроды Э-12X13 (марка УОНИ-13/Х13);

- для стали 15X11МФ электроды Э-12X11НМФ (марка КТН-9).

Для автоматической сварки под флюсом:

- для стали 12X13 и 20X13 — проволоку марки Св-06X13 и флюс АН-20;
- для сварки в среде углекислого газа сталей 12X13 и 20X13 — проволоку марки Св-08X14ГНТ.

Основной особенностью свариваемости хромистых сталей ферритного класса является их повышенная склонность к росту зерна в ЗТВ и шве (если последний аналогичен по своему химическому составу основному металлу). Для ослабления этого процесса рекомендуется применение способов сварки с сосредоточенными источниками тепла с ограничением погонной энергии.

При применении сварочных материалов, дающих в шве А или А+Ф структуру, необходимо учитывать разбавление металла шва расплавленным основным металлом с целью сохранения в шве структуры желаемого типа.

Аустенитные высоколегированные стали

К этому классу относятся стали, имеющие повышенное содержание легирующих элементов, которые при всех температурах обеспечивают аустенитную структуру металла. Наиболее распространены стали системы легирования Сг-Ni. Стали этой системы являются аустенитными при содержании хрома и никеля не менее 16 и 7% соответственно. Такие стали немагнитны, обладают высокой хладноустойчивостью, жаропрочностью, жаростойкостью и коррозионной стойкостью в различных коррозионных средах. Как правило, они содержат минимальное количество углерода, обладая при этом достаточной прочностью и высокой пластичностью. При закалке эти стали приобретают повышенную пластичность.

Структурные состояния сталей этого класса могут быть весьма разнообразными и зависят от содержания в стали элементов ферритизаторов и аустенизаторов (рис. 8.5). Приведенная на этом рисунке структурная диаграмма Шеффлера может быть использована и для подбора сварочных материалов в связке химсостав-структура. При этом эквивалентное содержание хрома и никеля в металле шва можно определять по формулам

$$[\text{Ni}]_{\text{экв}} = \% \text{Ni} + 30[\% \text{C}] + 30[\% \text{N}] + 0,5[\% \text{Mn}];$$

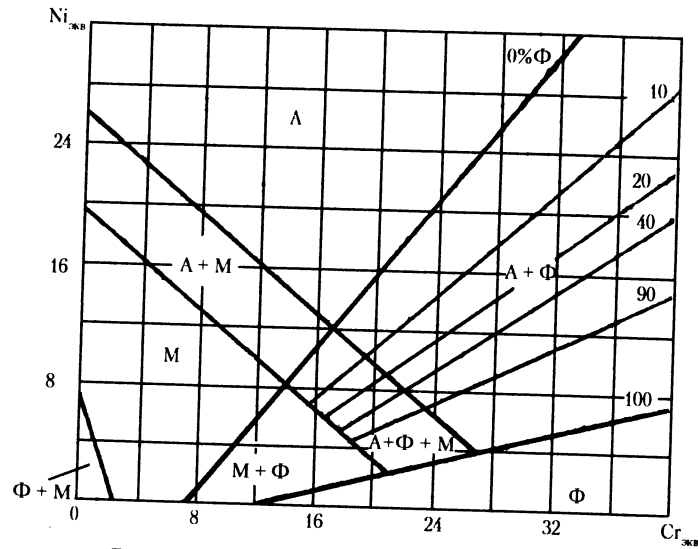


Рис. 8.5. Структурная диаграмма Шеффлера

$$Cr_{экв} = \%Cr + 2 \times [\%Mo] + 1,5 \times [\%Si] + 5 \times [\%Ti] + 2 \times [\%Nb] + 2 \times [\%Al] + 1,5 \times [\%W] + \%V.$$

Подсчет содержания элементов в металле шва по этим формулам производят с учетом долей основного и дополнительного металла.

Особенностей свариваемости сталей этого класса, которые нужно учитывать при разработке технологии, несколько.

1. Опасность возникновения в металле шва и ЗТВ так называемой межкристаллитной коррозии (МКК). Механизм этого явления, возникающего в определенной температурно-временной области, заключается в обеднении хромом пограничных областей зерен металла за счет его диффузии к границам зерен и образованию там карбидов хрома.

Причиной этому может служить неблагоприятный режим сварки (рис. 8.6) (малые скорости охлаждения), когда есть достаточно времени для диффузии атомов хрома из приграничных районов зерна к его границам и образованию там карбидов, что приводит к появлению зон металла, обедненных хромом. Они-то и подвергаются коррозионному разрушению при работе изделия в агрессивных средах.

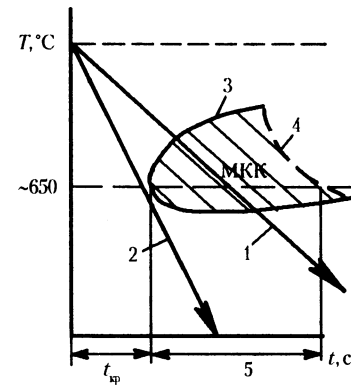


Рис. 8.6. Схематическое изображение области появления МКК аустенитной стали при ее нагреве:

1 – скорость охлаждения, способствующая выпадению карбидов; 2 – скорость охлаждения, не приводящая к выпадению карбидов; 3 – начало появления склонности металла к МКК; 4 – окончание процесса образования карбидов; 5 – первоначальная склонность к МКК ($t_{ин}$)

Для предупреждения МКК принимают ряд мер. Стараются снизить содержание углерода в стали до 0,02...0,03% (это уменьшает количество карбидов, так как такое содержание углерода полностью растворимо в твердом растворе аустенита). Часто сталь (и сварочные материалы) легируют такими элементами как титан, ниобий, ванадий, тантал. Эти элементы являются более энергичными карбидообразователями, чем хром, и раньше, чем хром, образуют карбиды, подавляя, таким образом, появление карбидов хрома.

Если не удается получить высокую скорость охлаждения сварного соединения, можно применить стабилизирующий отжиг при 850...900 °С либо провести аустенизацию – нагрев до 1050...1100 °С с последующим быстрым охлаждением. Возможно также создание в шве аустенитно-ферритной структуры с содержанием феррита до 20...25% путем дополнительного легирования хромом, кремнием, молибденом, алюминием и пр.

Реализация некоторых из этих рекомендаций технологическим путем заключается в разработке таких технологий, которые позволяют получать величину скорости охлаждения, попадающей для данной марки стали в инкубационный период образования карбидов хрома (см. рис. 8.6, кривая 2).

2. Наличие явно выраженной крупнодендритной столбчатой структуры металла шва, что повышает его чувствительность к

образованию горячих трещин. Для уменьшения этой опасности рекомендуется применение всех способов, приводящих к измельчению структуры: модифицирование металла титаном и ниобием, применение физических способов (введение вибрации, ультразвука, электромагнитное перемешивание), а также введение в шов элементов ферритизаторов, приводящих к получению в шве островков δ -феррита. Следует также избегать режимов сварки, приводящих к узкой и глубокой форме провара. Актуальным, особенно в глубокоаустенитных швах, является уменьшение содержания таких примесей как фосфор и сера, образующих легкоплавкие эвтектики.

3. Диффузионные процессы (особенно для жаропрочных сталей), происходящие в сварных соединениях при высоких температурах их эксплуатации. Так, термическое старение в диапазоне температур 350...500 °С вызывает появление «475-градусной хрупкости».

При температурах 500...650 °С наблюдается выпадение карбидов и образование σ -фазы, происходит выпадение интерметаллидов. Все эти процессы теплового старения приводят к охрупчиванию металла при низких температурах и снижению прочности при высоких. Эффективной мерой, предотвращающей вредное действие теплового старения, является уменьшение содержания углерода как в основном металле, так и металле шва.

Технология сварки сталей этого класса должна строиться с учетом как указанных особенностей, так и их теплофизических свойств. Последние характеризуются низкими значениями коэффициента теплопроводности и высокими значениями коэффициента линейного расширения. Отсюда вытекает (при прочих равных условиях по сравнению с перлитными сталями) увеличение глубины проплавления. Для уменьшения деформаций наилучшими способами и режимами сварки будут те, которые характеризуются максимальной концентрацией тепловой энергии.

Технологические способы борьбы с образованием трещин предусматривают изыскание конструктивных форм сварных соединений и режимов сварки, снижающих темп нарастания деформаций в процессе остывания соединения. Важной является форма проплавления, которая не должна быть глубокой при малой ширине (опасность появления горячих трещин по плоскости спайности кристаллитов в сварочной ванне при кристаллизации).

Для сварки этого класса сталей применимы практически все способы сварки плавлением.

При ручной сварке плавящимся покрытым электродом основной трудностью является стабильное обеспечение требуемого химического состава шва в зависимости от его пространственного положения при различных типах сварного соединения с учетом изменения количества наплавленного металла и глубины проплавления основного. Это достигается в основном за счет корректировки состава покрытия (по содержанию в шве необходимого количества феррита).

Тип покрытия — основной (например, фтористокальциевое), ток постоянный обратной полярности. Швы рекомендуется выполнять на малых токах при минимальном диаметре электрода (во избежание появления горячих трещин). При сварке наиболее распространенных коррозионностойких сталей марок 08X18H10, 08X18H10T, 12X18H10T, 08X18H12T и т. д. рекомендуется применять электроды типа Э-04X20H9, Э-07X20H9, Э-08X19H10Г2Б марки ЦЛ-11 и др.

При сварке ответственных конструкций следует применять меры, предотвращающие попадание капель расплавленного металла на поверхность основного металла во избежание микротермических ударов, способных при эксплуатации вызвать коррозионное растрескивание под напряжением в этих районах.

Автоматическая сварка под флюсом широко распространена для изготовления конструкций из элементов в толщинах 4,0...60,0 мм. При этом процесс обеспечивает высокая стабильность химического состава шва по длине с одновременной хорошей защитой шва и его формированием. Ток постоянный, полярность — в зависимости от марки применяемых флюсов. Режимы по току невелики (по сравнению с перлитными сталями). Легирование шва производят через флюс или через проволоку. Флюсы безокислительные или малоокислительные (низкокремнистые фторидные или высокоосновные безфтористые). Широко применяются марки АН-26, 48-ОФ-10 и АНФ-14. В зависимости от марки свариваемой стали выбирается система флюс-проволока (например, для стали 20X23H8 проволока Св-13X25H18, флюс АНФ-5).

При сварке в защитных газах используют как активные газы (CO_2), так и инертные (аргон, гелий) либо их смеси. Здесь (особенно при применении смесей) появляется возможность широко регулировать форму проплавления, повышать стабильность горения дуги и уменьшать угар легирующих элементов. При сварке в инертных газах возможно применение как неплавящегося (вольфрамового), так и плавящегося электрода. Первый применяют для сварки металла небольших толщин либо для обеспечения качественного проплавления.

ния корня шва. Вольфрамовый электрод применяют в сочетании с аргоном высшего или первого сорта для выполнения соединений в толщинах до 12,0 мм (что не исключает применения способа и для сварки больших толщин).

Сварка ведется на постоянном токе прямой полярности во всех пространственных положениях непрерывной или импульсной дугой. Последний способ при отличном формировании шва на малых толщинах позволяет уменьшить деформации и ширину ЗТВ, получить дезориентированную структуру первичной кристаллизации шва, уменьшая этим опасность возникновения горячих трещин. При сварке плавящимся электродом можно регулировать состав наплавленного металла за счет изменения состава защитной атмосферы.

Сварку плавящимся электродом выполняют как в инертных, так и в активных газах или их смесях. В зависимости от плотности тока и диаметра электродной проволоки перенос металла в дуге может быть капельный и струйный (последний представляется более предпочтительным — при нем практически исключается разбрызгивание).

Струйный перенос кроме критического тока связан с составом газовой атмосферы. Так, добавка 3...5% кислорода уменьшает величину критического тока и (за счет окисления) уменьшает пористость, вызванную водородом. Последнее достигается смесью 85...80% Ar + 15...20% CO₂. Эта смесь дешевле чистого аргона, однако, здесь существует опасность выгорания легирующих элементов из наплавляемого металла. Этот же процесс сопутствует сварке в чистом CO₂, как и определенное науглераживание наплавленного металла.

Сила тока при сварке вольфрамовым электродом выбирается в зависимости от его диаметра, а при сварке плавящимся электродом — в зависимости от диаметра электродной проволоки и толщины свариваемых элементов. Так, для толщины 4,0 мм встык без разделки кромок сварка ведется в один проход $d_3 = 1,0...1,6$ мм; $I_{св} = 160...280$ А; расход аргона $\varphi = 6...8$ л/мин, а сварка толщины 8,0 мм с V-образной разделкой — в два прохода проволокой $d_3 = 1,6...2,0$ мм при силе тока $I_{св} = 240...340$ А, при расходе $\varphi = 12...15$ л/мин.

8.6. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Очень часто по разнообразным причинам в современной промышленности применяют комбинированные конструкции с использованием для

отдельных ее элементов различных материалов, свойства которых могут значительно отличаться друг от друга. Сочетания материалов могут быть весьма разнообразны. Чаще всего возникает необходимость сварки разнородных сталей. Здесь можно выделить два весьма характерных случая: свариваются стали одного структурного класса, но разного легирования и свариваются стали различных структурных классов (сварка сталей перлитного класса с высокохромистыми сталями мартенситного, мартенсито-ферритного или ферритного класса; сварка сталей перлитного класса с аустенитными хромоникелевыми сталями).

Сварка сталей одного структурного класса. Здесь технологию сварки выбирают по свойствам более легированной стали (в том числе и температуру подогрева в случае его необходимости). Пример: при сварке стали 20 со сталями 15ХМ, 12МХ, 20ХМЛ, 30ХМА при ручной сварке выбирают электроды типа Э42А-Ф, при сварке под флюсом — проволоку Св-08А. После сварки изделия либо не подлежат термообработке (при малом содержании углерода в более легированной стали), либо назначается термообработка 630...650 °С.

Если свариваются разнородные аустенитные стали, то необходимо, в зависимости от запаса аустенитности, выбирать сварочные материалы, обеспечивающие предотвращение горячих трещин в металле шва. При этом структура шва должна быть аустенитно-ферритной с нормированным содержанием феррита. Однако, если свариваются стали с большим запасом аустенитности, то шов должен иметь аустенитную или аустенитно-карбидную структуру с легирующими элементами, повышающими сопротивляемость металла к образованию горячих трещин (например, ниобием). Пример: сварка стали 12Х18Н10Т со сталью 08Х17Н16М2Т. При ручной сварке могут быть применены электроды ЭА-1 или ЭА-1Б, при сварке под флюсом — проволока марки Св-04Х19Н9 или Св-05Х19Н9Ф3С2 (флюсы основные).

Если есть необходимость снять остаточные сварочные напряжения после сварки, то назначают термообработку (стабилизацию при 500...850 °С)

Сварка сталей различных структурных классов. Если свариваются перлитные стали с 12%-ми хромистыми сталями, то выбирают сварочные материалы перлитного класса, ибо они обеспечивают максимальную пластичность металла шва; при этом металл шва должен легироваться карбидообразующими элементами.

Температура подогрева берется по более легированной (хромистой) стали (так же, как и режим последующей термообработки). Если хром в стали находится в пределах 17...28%, то перлитные электроды не применяются из-за чрезмерного падения пластичности металла шва; здесь более целесообразно использовать материалы ферритно-аустенитного класса, иногда рекомендуются и электроды аустенитного класса (без последующей термообработки).

Сварка перлитных сталей с аустенитными ведется всегда аустенитными электродами (с учетом максимальной доли участия перлитной составляющей в шве с аустенитной структурой). Для приблизительной оценки структурных составляющих в металле шва в зависимости от его химического состава стали и присадочного металла можно пользоваться диаграммой Шеффлера. Соединения из перлитной и аустенитной стали термической обработке, как правило, не подвергают. Это связано с тем, что режимы термообработки различны для перлитных и аустенитных сталей (что хорошо для одной, то может быть плохо для другой). Кроме этого, различие в коэффициентах линейного расширения у этих сталей при термообработке может вызвать не снятие остаточных сварочных напряжений, а их неблагоприятное распределение, что при сварке больших толщин может вызвать хрупкие разрушения.

Сварка разнородных металлов между собой. Принято считать, что хорошо свариваются между собой металлы, обладающие неограниченной взаимной растворимостью в твердом и жидком состоянии (при этом различие атомных диаметров элементов этих металлов не должно превышать 15%). Таких пар не очень много. Примерами могут служить Ni-Cu, Ti-Zn, Ti-Nb, Ti-Ta и др. Остальные металлы образуют ограниченный ряд твердых растворов, эвтектики и химические соединения, снижающие механические свойства сварного соединения, что делает пары таких металлов трудно либо вовсе несвариваемыми.

При образовании химических соединений шов характеризуется высокой твердостью, изменяется плотность, коэффициент теплового расширения и температура плавления. На пределы растворимости одного металла в другом, как и на свойства химических соединений, оказывают влияние легирующие элементы и примеси, что сказывается также на свариваемости.

Классическим примером пар разнородных металлов, образующих химические соединения при ограниченной растворимости, являются пары Ti-Fe и Al-Fe. Для таких пар получение качественного свар-

ного соединения методами сварки плавлением является сложной проблемой (особенно если учесть характерную для этих металлов высокую химическую активность). Для таких металлов как ниобий, титан, молибден, тантал, вольфрам взаимодействие с кислородом, азотом и углеродом приводит к опасности охрупчивания сварного соединения.

Способов соединения сваркой таких пар несколько. Так, для пары Al-Fe применяют расплавление более легкоплавкого металла (Al) с покрытием, нанесенным на слой более тугоплавкого металла. Металл покрытия должен либо повышать предел взаимной растворимости соединяемых металлов, либо способствовать торможению диффузионных процессов на границе контакта металлов или повышать пределы взаимной растворимости элементов, влияющих на образование химических соединений. В этом случае на поверхность стали в районе сварки методом гальванизации наносят слой цинка $s = 40...60$ мкм (если сталь хромоникелевая, то после нанесения цинка производится алитирование). Можно также наносить на стальную деталь слой алюминия (алитированием или с помощью ТВЧ). Технология сварки требует точного подбора параметров режима во избежание проплавления нанесенного слоя.

Для соединения между собой крупных конструкций из разных металлов (например, стенок надстройки из алюминиевого сплава со стальной палубой корпуса) разработан биметалл сталь-алюминий, получаемый методом прокатки или сварки взрывом (рис. 8.7).

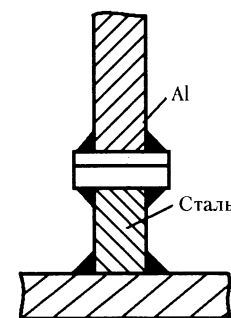


Рис. 8.7. Соединение алюминия со сталью через биметаллическую вставку

Соединение здесь производится с помощью биметаллических полос Al-Fe.

При сварке плавлением пар металлов с разной температурой плавления (например, при сварке ниобия со сталью) иногда применяют следующий прием. Дугу (или электронный луч) смещают в сторону более легкоплавкого металла, и сварка осуществляется практически в твердожидком состоянии. Режим и технологию сварки в этом случае подбираются весьма точно — должна строго соблюдаться температура нагрева подложки (металла нерасплавляемого) и время контакта жидкого металла с твердым (во избежание образования интерметаллических соединений).

Если же металлы образуют ряд непрерывных твердых растворов, но имеют существенное различие в теплофизических свойствах (Ti-Nb, Nb-Mo), а элементы соединяемых металлов имеют ограниченную растворимость, то возможна их непосредственная сварка методом плавления со строгой регламентацией концентрации элементов в расплаве (это достигается смещением электрода с линии стыка и другими способами).

Сварка титана со сталью возможна способом плавления через ванадиевую вставку (ванадий образует твердые растворы и с железом и с титаном) либо с применением биметаллических вставок Ti-Fe.

9. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ НА ИХ ОСНОВЕ

9.1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИМЕНЯЕМЫХ В СУДОСТРОЕНИИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ. ОСОБЕННОСТИ ИХ СВАРИВАЕМОСТИ

Свариваемость любых металлов и сплавов, прежде всего, непосредственно зависит от их физико-химических свойств. Поэтому при разработке оптимальных технологий сварки конструкций различными способами их следует учитывать в первую очередь. В судостроении наибольшее применение находят такие цветные и химически активные металлы как медь, алюминий, титан и их сплавы (табл. 9.1).

Таблица 9.1

Основные физические свойства наиболее распространенных цветных металлов

Металл	γ , г/см ³	$T_{пл}$, °C	λ , кал см · с · °C	$\alpha_m \times 10^6$, град ⁻¹	σ_v , МПа	δ , %
Медь	8,96	1083	0,923	16,8	160–270	Не менее 40
Алюминий	2,7	660	0,538	24,3	70–110	Не менее 40
Титан	4,51	1668	0,036	8,5	240–345	40–55

Медь принадлежит к группе тяжелых металлов, алюминий — легких, титан — химически активных. Все эти металлы достаточно технологичны. Из них (и их сплавов) изготавливают различные полуфабрикаты (листы, профили, прутки, ленту и т. д.).

Медь — диамагнитный металл, механические свойства которого в значительной степени зависят от чистоты и предшествующей пластической обработки. Чистая медь чрезвычайно пластична, обладает хорошей теплопроводностью и высокой электропроводностью, коррозионно-стойка в пресной и морской воде. Находит широкое применение в электротехнической промышленности, химическом машиностроении,

изделиях, работающих в условиях глубокого холода. В судостроении применяется для различного рода трубопроводов (в том числе для трубопроводов забортной воды).

Алюминий – легкий, хорошо тепло- и электропроводный металл, обладает высокими пластическими свойствами, слабомагнитен. Обладая высокой химической активностью, легко образует окисную пленку, плотно сцепленную с поверхностью металла. Благодаря защитному действию окисной пленки металл обладает высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях и средах, которые эту пленку не разрушают (в том числе в морской воде).

Чистый алюминий применяется в электропромышленности, а его более прочные сплавы – в разнообразных авиа- и космических конструкциях, в автомобильной, строительной промышленности. В судостроении – для изготовления надстроек, корпусов судов с динамическими способами поддержания, катеров и яхт.

Титан – химически активный металл при высокой температуре (особенно в расплавленном состоянии), хотя при комнатной температуре весьма устойчив против окисления. Теплопроводность у него меньше, чем у меди и алюминия, а удельное электросопротивление больше, немагнитен, обладает весьма высокой коррозионной стойкостью во многих средах (в том числе в морской воде), что объясняется образованием на его поверхности плотной защитной окисной пленки.

Чистый титан весьма пластичен при относительно невысокой прочности. Имеет две модификации (α и β). При легировании такими элементами как алюминий, ванадий, марганец, цирконий, железо, олово и др. прочность сплавов может достигать весьма высоких значений. Широкое применение имеют α -сплавы титана, которые наряду с высокой прочностью хорошо поддаются всем видам технологической обработки. Из многих марок титановых сплавов изготавливаются листы, профильный прокат, прутки, полосы, трубы, проволока, фольга и пр.

Находит широкое применение в химическом машиностроении, авиа-, ракетно-, приборостроении, металлургической и пищевой промышленности. В судостроении применяется для изготовления трубопроводов, теплообменных аппаратов. Имеются случаи применения сплавов титана в качестве конструкционного корпусного материала (корпус подводной лодки «Комсомолец»).

Для всех рассматриваемых металлов и сплавов можно выделить следующие особенности, осложняющие в той или иной мере их свариваемость.

1. Высокое сродство к кислороду (особенно у титана и алюминия). Так, при сварке алюминия и его сплавов вследствие

легкой окисляемости в твердом и расплавленном состоянии образуется тугоплавкая ($\sim 2050^\circ\text{C}$) пленка окиси Al_2O_3 . Она препятствует плавлению, ухудшает формирование шва и засоряет его окисными неметаллическими включениями.

При сварке титана и его сплавов в твердом нагретом и расплавленном состоянии проявляется его чрезвычайно высокая химическая активность, приводящая к растворению в жидком титане кислорода, азота и водорода с неизбежной потерей пластичности и охрупчиванию металла шва до недопустимых величин. С учетом возможности появления холодных трещин, указанные обстоятельства предъявляют к технологии сварки особые требования по защите алюминия от появления пленки Al_2O_3 при сварке и особо тщательной защите зоны сварки и прилегающих к ней нагретых поверхностей металла от проникновения атмосферных газов для титана.

Следует также отметить, что высокая растворимость в жидких металлах (особенно алюминии) таких газов как водород приводит к образованию в металле шва газовой пористости.

2. Высокая теплопроводность и теплоемкость таких металлов как медь и алюминий вызывает быстрое охлаждение зоны сварки и требует применения более мощных локализованных источников теплоты, чем при сварке сталей перлитного класса. Высокий тепловой коэффициент линейного расширения и большая усадка алюминия приводят к повышенным сварочным деформациям.
3. Значительная жидкотекучесть меди и алюминия, потеря прочности этих металлов в определенных интервалах температур при нагреве может приводить к возможности разрушения во время сварки (алюминий) либо появления трещин при сварке в жестком закреплении (медь). Это требует применения подкладок при сварке «на весу» (алюминий) или ослабления жесткости соединения (медь).
4. Низкая температура плавления и кипения отдельных легирующих элементов у некоторых сплавов (например, цинка и олова в латунях и бронзах) приводит к образованию легколетучих паров, что, с одной стороны, определяет образование пористости в металле шва, а с другой, ухудшает санитарно-гигиенические условия в районе сварки из-за высокой ядовитости этих паров.
5. Теплофизические свойства таких металлов как медь и алюминий (и их сплавов) приводят к крупнокристаллическому строению металла шва при его кристаллизации, что при наличии легкоплавких эвтектик повышает склонность металла шва к образованию горячих трещин.

9.2. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ

Уже отмеченная выше высокая теплопроводность меди (почти в 6 раз больше, чем у стали) требует применения источников с большой тепловой мощностью и повышенную погонную энергию. Высокие скорости охлаждения металла шва и околосшовной зоны приводят к быстрой кристаллизации, что затрудняет полноту протекания металлургических реакций и ухудшает формирование шва. Улучшить положение может предварительный и сопутствующий подогрев, рекомендуемый при сварке толщин более 10,0 мм.

Серьезной трудностью является высокая склонность металла шва к образованию горячих трещин. Она связана с большой величиной усадочного расширения, а также наличием легкоплавких эвтектик. Эвтектики эти образуются примесями, присутствующими в меди (кислород, свинец, висмут, сурьма, сера). Например, свинец образует окислы (PbO - PbO_2 - PbO_3) и дает эвтектики с температурой плавления 326 °С. Отсюда, для улучшения свариваемости существует стремление к уменьшению содержания этих примесей в меди. Так, для ответственных сварных конструкций массовая доля вредных примесей в меди составляет: O_2 – до 0,01; Bi – до 0,002; Pb – 0,005. В некоторых особых случаях для сварных конструкций рекомендуется уменьшение в металле массовой доли кислорода до 0,003.

Кислород ведет также к образованию закиси меди Cu_2O , которая при взаимодействии с водородом восстанавливается до меди с образованием паров воды. Эти пары, накапливаясь в микродефектах металла, создают в нем давление, которое приводит к образованию микротрещин, в интервале хрупкости меди при температурах 300...350 °С. Это явление называют «водородной болезнью» меди.

Атомарный водород хорошо растворяется в жидкой меди, причем растворимость растет с увеличением температуры (рис. 9.1). Скачок растворимости при переходе является предпосылкой к образованию газовой пористости в металле шва, так как при высоких скоростях кристаллизации, присущих меди, времени для полного удаления газов, растворенных в жидком металле, оказывается недостаточно. Здесь определенную помощь может оказать подогрев, увеличивающий время нахождения сварочной ванны в жидком состоянии. Что касается азота, то он в меди не растворяется совершенно и не образует с ней химических соединений, являясь по отношению к ней инертным, и может применяться при сварке меди в качестве защитного газа. Азот в ряде случаев является газом даже более предпочтительным, так как позволяет

иметь «горячую» дугу из-за ее большей, чем при других газах, длины (рис. 9.2) дуги и связанную с этим большую тепловую мощность.

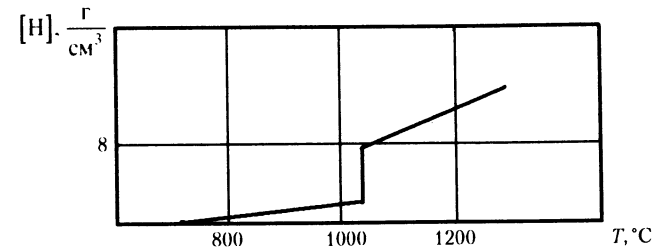


Рис. 9.1. Зависимость растворения водорода в меди от температуры

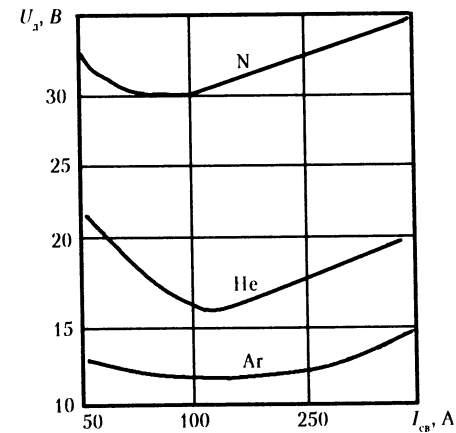


Рис. 9.2. Статические характеристики дуги W-Cu в зависимости от свойств защитного газа

Для сварки меди применимы практически все способы электродуговой сварки плавлением. Электродуговая сварка покрытыми электродами выполняется на постоянном токе обратной полярности. При сварке толщин 2,0...5,0 мм без разделки кромок применяют электроды диаметром 3,0...5,0 мм, силу тока (в зависимости от диаметра электрода) выбирают в диапазоне 120...300 А. Начиная с 5,0 мм, делается односторонняя V-образная разделка со скосом 60...70° (до 10,0 мм). Для толщин выше 10,0 мм рекомендуется X-образная разделка.

При многопроходной сварке применяют электроды диаметром 6,0...8,0 мм при сварочном токе до 500 А. При сварке толщин более 10,0 мм рекомендуется предварительный подогрев до 200...300 °С, при толщинах выше 20,0 мм – до 750...800 °С. При сварке стыковых соединений используют стальные, медные или асбестовые подкладки.

Электроды для сварки меди могут иметь как медный стержень, так и бронзовый (наиболее распространена бронза БрКМц3-1) и специальное покрытие, из которого металл шва может подлегироваться кремнием, марганцем и железом. Наиболее распространенные марки электродов «Комсомолец-100» ЗТ и АНЦ-1. При сварке первыми сварное соединение имеет прочность 180...200 МПа, а угол загиба 150...180°.

Сварка латуни затруднена тем, что цинк, входящий вторым элементом в двухкомпонентную латунь, обладает низкой температурой кипения (907 °С), близкой к температуре плавления самого сплава (900...1000 °С). Пары и окись цинка имеют высокую токсичность, образующая пылевидная смесь окиси цинка затрудняет видимость в районе сварки; испарение цинка приводит к образованию пор в металле шва.

Известен ряд марок электродов для сварки латуни (в основном они используются для заварки дефектов). Так, для заварки дефектов в гребных винтах рекомендуются электроды марок АСЗ-6 и ЭМЗ-2. При большой массе отливок требуется предварительный подогрев до 250...300 °С.

Технология сварки безоловянистых бронз стремится выбрать такой термический режим, который давал бы узкую зону нагрева. Это связано с провалом прочности в районе 400 °С у этих сплавов, что при резком изменении температур чревато образованием трещин в ЗТВ и металле шва. Для разрядки напряжений при многослойной сварке рекомендуется проковка каждого прохода, кроме первого, при температуре не выше 200 °С.

Алюминистые бронзы из-за повышенной теплопроводности требуют обязательного подогрева при толщине свариваемых элементов более 16,0 мм.

Известны электроды марки АБ-2, применяемые для сварки трубопроводов и литья из бронз Бр.АЖ9-4, Бр.АЖМц-10-3-1,5 и др. Что касается сварки оловянистых бронз, то их свариваемость зависит от содержания олова и ухудшается с его увеличением в сплаве (появляется опасность образования трещин в ЗТВ). При ручной сварке могут применяться электроды марок Бр.1/ЛИИВТ, Бр.3/ЛИИВТ, предназначенные для сварки облицовочных втулок гребных судовых валов из бронзы Бр.010Ц2 и заварки дефектов литья из бронзы Бр.ОЦ4-3.

При автоматической сварке под флюсом могут использоваться специальные керамические флюсы типа ЖМ-1. Для меди средних толщин

(4,0...10,0 мм) удовлетворительные результаты получаются при использовании стандартных плавящихся флюсов ОСЦ-45, АН-348А, АН-20С. Для больших толщин рекомендуется использование специальных флюсов (АНМ-13). В качестве электродной проволоки применяется бескислородная медь марки МБ или техническая медь марки М1 (массовая доля кислорода лишь 0,01).

В зависимости от технических требований (увеличение прочности) в качестве электродной проволоки для сварки меди и бронзы можно применять проволоки марок Бр.КМц3-1; Бр.ХТ0,6-0,5; Бр.Х07 и др. Сварка ведется на постоянном токе обратной полярности. Кромки до толщины 25 мм не разделяют (режим выбирают для диаметра электрода 4,0...5,0 мм).

При сварке металла большой толщины обычно выбирают U-образную разделку с достаточной величиной притупления (5,0...8,0 мм). Сварка может производиться как расщепленным электродом (два электрода, расположенных поперек шва), так и одним электродом (диаметром 6,0 мм). Коэффициент расплавления электродной проволоки составляет около 20 г/А·ч, скорость расплавления из-за малого электрического сопротивления не зависит от величины вылета. Для получения сварных соединений высокого качества необходима тщательная зачистка от окисной пленки свариваемых кромок и электродной проволоки, флюс должен быть прокален непосредственно перед сваркой.

При сварке латуни используют бронзовые проволоки (Бр.КМц3-1 и др.) и флюсы (АН-20, ФЦ-10, МАТИ-53). Рекомендуется сварка на короткой дуге во избежание выгорания цинка. Этот способ применим и для сварки бронз. Железистые и марганцевистые бронзы хорошо свариваются под флюсом АН-20 проволокой Бр.АМц9-2. Ток постоянный, полярность обратная.

Для сварки меди и ее сплавов широко применяется *сварка в защитных газах плавящимся и неплавящимся электродом*.

Область применения вольфрамовых электродов ограничивается толщинами 4,0...6,0 мм (в аргоне) и 6,0...8,0 мм (в азоте и гелии); для этих толщин предварительный подогрев не требуется. Применение плавящегося электрода расширяет диапазон свариваемых толщин (6,0...8,0 мм для аргона и 10,0...12,0 мм для азота и гелия).

Техника сварки в различных по составу инертных средах различается необходимостью поддержания разных по длине дуг. При сварке в аргоне и гелии длина дуги невелика (около 3,0 мм), а при сварке в азоте она достигает 12,0 мм. Отсюда, дуги, горящие в различных газовых средах, имеют отличающиеся друг от друга статические характеристики (см. рис. 9.2). При выбранном сварочном токе напряжение на дуге, а значит ее мощность и

тепловложение самые высокие в азоте (в 3–4 раза больше, чем в аргоне). В гелии эти же показатели в 2 раза выше, чем в аргоне.

Для сварки неплавящимся электродом в качестве присадки может применяться как чистая раскисленная медь, так и бронзы и медно-никелевые сплавы. При применении азота следует учитывать большую (чем при гелии и аргоне) склонность сварных швов к порообразованию, что связано с понижением жидкотекучести металла сварочной ванны. Область режимов при ручной сварке неплавящимся электродом хорошо иллюстрируется схемой (рис. 9.3).

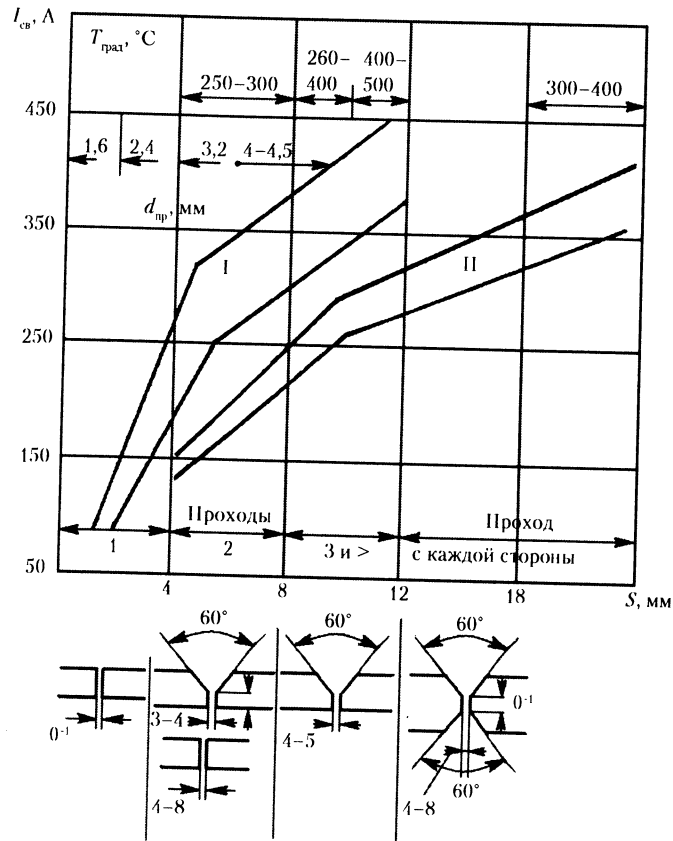


Рис. 9.3. Ориентировочные режимы по току, температуре подогрева и форме разделок для ручной сварки меди вольфрамовым электродом:

I — область односторонней сварки;
II — область двухсторонней сварки одновременно в вертикальном положении

Для сварки плавящимся электродом применяется постоянный ток обратной полярности. Этот процесс обеспечивает повышение производительности в 2–3 раза (по сравнению с вольфрамовым электродом), однако получение качественных швов требует тщательного подбора режимов для каждого диаметра электродной проволоки во избежание нарушения стабильности процесса и образования газовой пористости.

Достаточно эффективно применение сварки неплавящимся и плавящимся электродом для изготовления конструкций из латуни и бронзы. Для латуни при сварке плавящимся электродом наряду с бронзовыми проволоками часто используется проволока из сплава Бр.КМц3-1. Применение гелия при сварке бронз за счет более «горячей» дуги позволяет вести процесс без предварительного подогрева.

Считается перспективным применение плазменной сварки из-за возможности высоких тепловложений и сварки стыковых соединений больших толщин без разделки кромок. Так, возможна односторонняя сварка толщин 50...60 мм. Используются плазмотроны прямого действия, плазмообразующий газ: смесь аргона с гелием (до 85% последнего). В качестве присадочной проволоки рекомендуется применение порошковой проволоки ПП.Бр.ХТ12-2, что позволяет хорошо раскислить и долегировать металл шва, уменьшив тем самым склонность его к образованию горячих трещин. В ряде отраслей промышленности применяется электронно-лучевая и электрошлаковая сварка элементов конструкций большой толщины из меди и ее сплавов.

9.3. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ

По содержанию в земной коре алюминий является самым распространенным металлом. Массовая доля его составляет около 8,8, превышая содержание железа примерно в 1,7 раза. Применение алюминия и особенно его сплавов весьма распространено в современной промышленности. Алюминий имеет специфические теплофизические свойства: он обладает высокой теплоемкостью, теплопроводностью и скрытой теплотой плавления при относительно низкой (~680 °C) температуре плавления. Он немагнитен, обладает высокой электрической проводимостью и в чистом виде весьма пластичен при относительно низкой прочности и малой плотности (2,7 г/см³).

Эти свойства ограничивают применение чистого алюминия как конструкционного материала. В основном он используется для нужд

электротехнической промышленности (провода, шинопроводы и т. д.), иногда – пищевой и химической промышленности, где используется высокая коррозионная стойкость металла в различных средах. Как конструкционный материал применяются сплавы алюминия, которые можно подразделить на литейные и деформируемые.

В зависимости от системы легирования эти сплавы могут быть отнесены к сплавам, не упрочняемым термообработкой (алюминиево-марганцевые сплавы типа АМц и алюминиево-магниево-марганцевые сплавы АМг3, АМг6, АМг61), и термически упрочняемым сплавам нескольких групп (дюралюмины системы Al-Cu-Mg-Mn типа Д16, Д19, ВАД1, ВД17, М40, Д18), авиали системы (Al-Mg-Si типа АВ), а также других систем легирования (АД31, АД33, АД35, АК6, АК8).

Сварка термически неупрочняемых сплавов особых трудностей не вызывает, прочность сварного соединения составляет ~0,95 от прочности основного металла. Современные сплавы системы Al-Mg 1561 и 1575 имеют предел текучести соответственно 180...200 и 300 МПа. Полуфабрикаты из этих сплавов поставляются в виде листов, профилей и панелей. Их высокая прочность при малом удельном весе сплава по сравнению со сталями позволяет снизить массу конструкции в 1,25–1,5 раза при хорошей коррозионной стойкости в морской воде.

Термоупрочняемые сплавы имеют прочность значительно более высокую, нежели сплавы первой группы. Конкретные значения прочности определяются системой легирования и типом термообработки. Так, для сплава Д20 после закалки и старения прочность $\sigma_{\text{в}}$ достигает 430 МПа, а у сплавов марки В93 она еще выше. Сварка металла в термоупрочненном состоянии приводит к его разупрочнению, что понижает прочность соединения на 30...35%. Последующая термообработка в принципе может почти полностью восстановить свойства соединения, но она технически трудно выполнима для габаритных конструкций. Сплавы этой группы имеют низкую коррозионную стойкость в морской воде и в судостроении не применяются.

Термически неупрочняемые сплавы марок 1561 и 1575 имеют широкое применение в судостроении для надстроек крупногабаритных судов, корпусов судов с динамическими принципами поддержания, корпусов малых судов различных классов. Этому в немалой степени способствует высокая коррозионная стойкость сплавов этой группы в морской воде и туманах и их хорошая технологичность.

Причиной высокой коррозионной стойкости, как уже было сказано, служит пленка окислов Al_2O_3 , покрывающая поверхность металла и имеющая высокий электродный потенциал. С другой стороны, эта же пленка, имеющая температуру плавления, в три раза превышающую

температуру плавления металла (~2050 °С), затрудняет его плавление при сварке и формировании металла шва.

Кислород растворяется в алюминии в ничтожно малых количествах, но образует с ним устойчивый окисел Al_2O_3 . При повышении температуры до 700 °С эта пленка надежно защищает металл от дальнейшего окисления. Благодаря высокому сродству алюминия к кислороду, пленка образуется на его поверхности уже при комнатной температуре ($\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$). После расплавления металла на его поверхности образуется более плотная окисная пленка другой модификации ($\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$). С ростом температуры толщина пленки $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$ увеличивается при одновременном уменьшении ее плотности; пленка становится рыхлой, и ее защитная способность уменьшается. Оставаясь неразрушенной на поверхности расплавленного металла, пленка препятствует его сплавлению, ухудшая формирование шва и засоряя металл шва окислами. При увеличении температуры во времени наблюдается рост толщины пленки. Так, при комнатной температуре толщина пленки составляет 0,001...0,0005 мкм, а с нагревом до температуры плавления она увеличивается до 0,2 мкм.

Рост толщины пленки наблюдается и при комнатной температуре во времени. За три месяца хранения на открытом воздухе толщина пленки достигает $7 \cdot 10^{-3}$ мкм, увеличение срока хранения приводит к дальнейшему росту толщины пленки.

Пленка $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$ плотно сцеплена с поверхностью металла. Удаление ее сопряжено со значительными трудностями (особенно если учесть, что ее рост начинается сразу после зачистки). Поэтому наличие пленки является одним из серьезных затруднений при сварке алюминия и его сплавов. Удаление ее во время процесса сварки может производиться двумя путями.

Первый – металлургический. Восстановление алюминия из окислов практически невозможно из-за их химической прочности; не удастся также связать Al_2O_3 в какое-либо прочное соединение. Поэтому действие флюсов для сварки алюминия основано на процессах растворения и смывания диспергированной окисной пленки расплавленным флюсом. Основу таких флюсов составляют смеси хлористых солей щелочных и щелочноземельных металлов с добавкой фтористых соединений. Эти же соединения входят в состав обмазки покрытых электродов.

Вторым путем является процесс так называемого катодного распыления. Он особенно характерен при сварке в инертных газах вольфрамовыми электродами. Этот процесс имеет место при сварке на постоянном токе обратной полярности, а на переменном токе – в те полупериоды, когда изделие является катодом. Сущность процесса

заключается в том, что, разогнавшись до больших скоростей в прика-
тодной зоне дуги, положительно заряженные ионы из столба дуги уда-
ряются о поверхность катода (зеркало ванны жидкого металла, покры-
тое пленкой), разрушая пленку. Дроблению этой пленки, по всей
вероятности, способствуют и электроны, имитируемые катодом под
действием электрического поля дуги. При сварке катодной очистке
подвергается и полоска основного металла в районе шва, включая за-
зор между свариваемыми кромками. Размеры зоны катодной очистки
зависят от силы тока и скорости сварки, и в общем случае по площади
зона очистки больше площади ванны (особенно интенсивно этот про-
цесс идет у пары W-Al). Кроме того, технология обязательно должна
предусматривать предварительную (перед сваркой) зачистку кромок
от окисной пленки либо путем травления (для мелких деталей), либо
механической зачисткой проволочными щетками непосредственно
перед сваркой.

Окисная пленка обладает еще одной особенностью, влияющей на
свариваемость алюминия. Она способна адсорбировать газы (в основ-
ном водяные пары, удерживаемые в ней вплоть до температуры плав-
ления металла). Диссоциируя в дуге на кислород и водород, молекула
воды приводит к насыщению жидкого металла водородом (рис. 9.4).

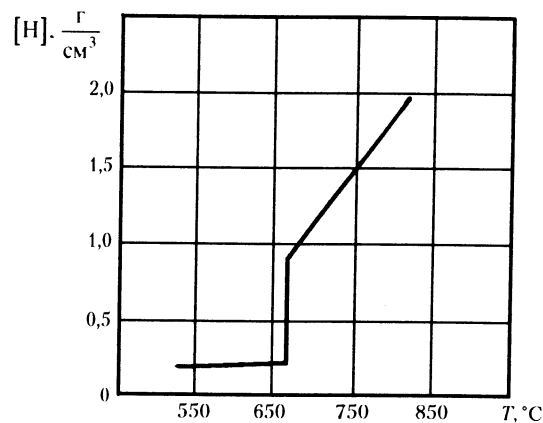


Рис. 9.4. Характер растворения водорода в алюминии при его нагреве

При охлаждении металла в момент кристаллизации растворимость
водорода скачкообразно снижается, и водород стремится выделиться
из металла. Образуются пузырьки газа, всплывающие в кристаллизую-
щемся металле шва; те из них, которые не успевают всплыть до полного

затвердевания металла, образуют пористость. Пузырек газа, возникший
в расплавленном металле, может существовать лишь тогда, когда дав-
ление внутри него равно давлению окружающей среды или больше этого
давления.

Существует определенное соотношение между концентрацией ра-
створенного в металле атомного водорода и давлением молекулярного
водорода в пузырьке. Можно считать, что зарождение газовых пузырь-
ков при небольшом пересыщении металла водородом носит гетероген-
ный характер, т. е. происходит на частичках различных взвесей, не сма-
чиваемых расплавом. Такие частички всегда присутствуют в металле
сварочной ванны.

По результатам некоторых работ, следует считать, что превышение
величины $[H]$ 0,7 см³/100 г уже приводит к образованию газовых пу-
зырьков. Поэтому необходимо применять технологические меры, умень-
шающие количество растворенного в жидком металле водорода. Вели-
ко также влияние состояния поверхности основного металла и
сварочной проволоки на количество водорода в металле сварочной ван-
ны и пористость металла шва. Основной вклад в этот процесс вносит
поверхность сварочной проволоки, поэтому способ ее подготовки име-
ет большое значение.

Сварочная проволока подлежит либо травлению в растворе кис-
лот, либо так называемому электрополированию. Последний способ
дает наиболее ровную поверхность, что препятствует сорбции влаги
на поверхности проволоки, уменьшению содержания водорода в ме-
талле шва и, как следствие, уменьшению пористости при сварке. После
электрополирования тонкая проволока для полуавтоматической свар-
ки должна сразу быть намотана в стандартные кассеты рядовым спосо-
бом; кассеты после намотки герметизируются во избежание нараста-
ния окислов алюминия на поверхность проволоки из газов открытой
атмосферы.

При сварке алюминиевых сплавов в сварных соединениях могут воз-
никать как горячие, так и холодные трещины. Особо чистый алюминий
(АВ000-АВ00) не склонен к образованию горячих трещин. Однако по мере
увеличения содержания кремния в металле стойкость металла к образова-
нию горячих трещин начинает уменьшаться. На эту характеристику ока-
зывает влияние и содержание железа в сплаве.

Так, при содержании в металле Si не более 0,35% и при поддержа-
нии соотношения Fe:Si $\geq 0,5$ горячие трещины не образуются. Чувстви-
тельность сплавов к образованию горячих трещин при сварке зависит
не только от содержания примесей, но и от системы легирования спла-
ва. Так, при сварке тонких листов из сплава Al-Mn образование горя-

чих трещин не наблюдается; с увеличением свариваемой толщины их образование начинает зависеть от соотношения Fe:Si. Сплавы системы легирования Al-Mg мало склонны к образованию горячих трещин. Этому способствуют малые добавки титана, обладающего модифицирующим действием. Сплавы системы Al-Si (при содержании Si в диапазоне 4...12%) значительно снижают температуру срастания первичных дендритов при кристаллизации шва, что уменьшает возможность возникновения горячих трещин. Термически упрочняемые сплавы системы Al-Mg-Si (марки АВ, АК6, АК8) обладают повышенной склонностью к образованию горячих трещин. Это объясняется наличием легкоплавкой эвтектики Al-Mg-Mg₂Si и двойных эвтектик Fe-Mg₂Si и Al-Si, расширяющих температурный интервал твердожидкого состояния. Здесь целесообразно применять присадки с содержанием кремния 4...6%. Этой же цели служит легирование присадки и усложнение ее химического состав. Однако при этом увеличивается линейная усадка металла сварного шва, что наряду с расширением температурного интервала твердожидкого состояния способствует образованию трещин.

Весьма склонны к образованию горячих трещин в металле шва сплавы систем Al-Cu-Mg-Mn и Al-Cu-Mg-Mn-Si. Повысить стойкость сварных соединений из этих сплавов помогают снижение содержания железа; добавки в сплав титана; применение присадок, увеличивающих, с одной стороны, количество легкоплавких эвтектик в металле шва (типа СвАК5), а с другой – содержание никеля, который связывает медь в интерметаллид, что сужает температурный интервал твердожидкого состояния.

В термически упрочняемых сплавах под влиянием термического цикла сварки происходят структурные превращения, что ухудшает прочностные и пластические характеристики металла и способствует появлению холодных трещин. При сварке отожженного сплава рядом с линией сплавления из-за высоких скоростей охлаждения металл фиксируется в неравновесном состоянии, что приводит к его последующему старению и упрочнению.

С целью уменьшения размеров опасных зон ($T = 550...600\text{ }^{\circ}\text{C}$) необходимо применять высококонцентрированные источники теплоты или вводить искусственное охлаждение свариваемого металла. Весьма перспективен, с точки зрения свариваемости, сплав системы Al-Zn-Mg. Сплавы этой группы склонны к самозакаливанию и упрочнению при последующем старении. Их свойства в литом состоянии достаточно высоки, кристаллизационные трещины отсутствуют.

Технология сварки различными способами

Ручная сварка покрытыми электродами применяется в основном для малоагруженных конструкций из чистого алюминия и его термически неупрочняемых сплавов (АМц и АМг).

Электродное покрытие состоит из галогенидов (хлористых и фтористых солей, щелочных и щелочноземельных металлов) и криолита (марки ЭА-1, ОЗА-2, ВАМИ, МАТИ-1). Свариваемые толщины 6,0...20,0 мм (без разделки кромок). Для сварки металла толщиной более 20,0 мм выполняется разделка кромок (угол раскрытия 70...90°, притупление 3,0...5,0 мм, зазор 1,5...2,0 мм).

Сварка производится на постоянном токе обратной полярности. Для металла средних толщин она ведется с подогревом от 250 до 400 °С (в зависимости от толщины). Устойчивый процесс обеспечивается, если принимать силу тока не более 60 А на 1 мм диаметра электрода. Ввиду большой гигроскопичности покрытия прокатка электродов перед сваркой обязательна. После сварки рекомендуется тщательная зачистка выполненного шва от шлака и окислов. Механические свойства шва считаются удовлетворительными.

Автоматическая сварка с применением флюса может быть двух видов: сварка по флюсу и сварка под флюсом.

При сварке по флюсу хорошее формирование шва достигается при строго ограниченной толщине флюсового слоя (сварка полуоткрытой дугой). Сварка производится на постоянном токе обратной полярности одной или двумя дугами (расщепленным электродом), как правило, на стальной удаляемой подкладке. Разделка кромок при свариваемых толщинах до 20 мм не производится.

При сварке под флюсом (или закрытой дугой) возможно еще большее повышение силы тока и увеличение глубины проплавления с обеспечением удовлетворительного формирования и качества металла шва.

И в том и в другом случае флюсы состоят из галогенидов и криолита. Такие флюсы практически не взаимодействуют с жидким металлом, удаляют окись алюминия и надежно защищают сварочную ванну от окисления. Прикатка флюса перед употреблением считается обязательной.

Однако самыми распространенными в современной промышленности способами сварки алюминиевых сплавов являются *способы сварки в инертных газах*. Сварка может выполняться как неплавящимся, так и плавящимся электродом. В качестве инертного газа применяют аргон первого сорта, гелий высокой чистоты или аргонно-гелиевую смесь.

Сварка неплавящимся электродом целесообразна для конструкций с толщиной элементов до 12,0 мм. Толщины до 3,0 мм сварива-

ют без разделки кромок на стальной подкладке односторонней сваркой, при толщинах до 6,0 мм – двухсторонней, при дальнейшем увеличении толщины применяют V- или X-образную разделку кромок.

Сварка ведется с подачей присадки в сварочную ванну (см. рис. 2.22), а зона сварки защищается потоком газа, истекающим из сопла горелки (так называемая «струйная» защита). При этом способе надежность газовой защиты зависит от формы и диаметра сопла горелки, а также от расстояния от среза сопла до свариваемого изделия, скорости поперечных сносящих потоков воздуха и т. д. Расход инертного газа подбирается экспериментально в зависимости от выбранных параметров режима сварки. Слишком большой расход газа может привести к его турбулентному истечению и нарушению газовой защиты за счет подсоса воздуха в реакционную зону.

Сварка может производиться как на постоянном, так и на переменном токе. На постоянном токе процесс возможен при катодом на изделии (обратная полярность). Однако в этом случае вольфрамовый электрод перегревается из-за большого количества теплоты, выделяемого в нем, что повышает расход электрода из-за возможного оплавления его конца. Поэтому рационально питание дуги осуществлять переменным током. Здесь в полупериоды, когда вольфрам является катодом, происходит его охлаждение, а когда изделие является катодом, идет разрушение и удаление окисной пленки (катодное распыление).

Однако на переменном токе условия горения дуги в различных полупериодах отличаются друг от друга. В полупериод, когда вольфрам является катодом, возникает мощный процесс термоэмиссии, увеличивается проводимость дугевого промежутка, что приводит к увеличению тока и снижению напряжения на дуге. Когда катодом становится изделие, то снижается проводимость дугевого промежутка, возрастает напряжение дуги и уменьшается ток. Поэтому синусоида тока дуги оказывается несимметричной (рис. 9.5), что приводит к появлению в цепи постоянной составляющей. Ее образование связано с различием тепловых свойств электрода и изделия, что приводит к тому, что напряжение, необходимое для горения дуги в одном полупериоде, значительно отличается от напряжения горения в другом полупериоде. Наличие такой постоянной составляющей за счет вентильного эффекта дуги W-Al считается нежелательным из-за ухудшения формирования сварного шва, и поэтому применяются меры к ее уничтожению или уменьшению.

Считается перспективным применение сварки на асимметричном переменном токе. В этом случае токи прямой и обратной полярности различаются (применяются специальные источники тока типа ОАРС).

Здесь в период обратной полярности идет катодная очистка, а в период прямой полярности действует импульс с увеличенной амплитудой, что приводит к увеличению проплавающей способности дуги. Регулируя режим, можно уменьшить тепловое воздействие дуги на металл, что особенно важно при сварке термопрочных сплавов, где желательно сузить ширину зоны разупрочнения. Сварка неплавящимся электродом характеризуется высокой устойчивостью горения дуги.

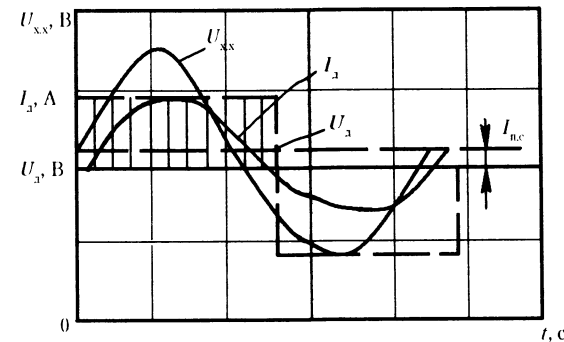


Рис. 9.5. К образованию составляющей постоянного тока в дуге W-Al

Применение импульсной дуги расширяет возможности применения способа (толщины от 0,2 мм и выше). При этом деформация (особенно при сварке малых толщин) снижается на 40...60%. Сварка больших толщин этим способом нецелесообразна из-за большого количества проходов и значительного снижения производительности.

Находят применение полуавтоматическая и автоматическая сварка. Параметры режима этих процессов: диаметр вольфрамового электрода d_3 [мм]; диаметр присадочной электродной проволоки $d_{п.п}$ [мм]; сила тока $I_{св}$ [А]; напряжение на дуге U_d [В]; скорость сварки $v_{св}$ [м/ч]; расход защитного газа Q [л/мин]. Иногда указывается скорость подачи электродной присадочной проволоки $v'_{п.п}$ [м/мин]. В качестве вольфрамового электрода лучше применять итрированный вольфрам марки ВИ. Сила тока выбирается в зависимости от диаметра вольфрамового электрода: $I_{св} = (60...70)d_3$. Выбор конструктивных элементов разделки осуществляется в соответствии с ГОСТ 23949-80. Непосредственно перед сваркой кромки разделки и прилегающие к ним поверхности должны быть тщательно обработаны стальной щеткой (проволока из нержавеющей стали диаметром 0,2 мм во избежание появления глубоких царапин на обрабатываемых поверхностях).

Сварку металла больших толщин целесообразно выполнять погруженной дугой, так как при этом можно значительно увеличить глубину проплавления. Так, при двухсторонней сварке без разделки кромок толщина свариваемого металла может быть доведена до 75 мм. Этот процесс ведется в гелии на постоянном токе 1500 А, диаметр вольфрамового электрода 15,0 мм, угол заточки его конца 90°, диаметр притупления 6,0 мм.

Способ плавящимся электродом целесообразен для элементов конструкций, начиная с толщин 4,0 мм. Ток постоянный, полярность обратная, источник тока должен иметь жесткую внешнюю характеристику – только в этом случае достигается надежное разрушение окисной пленки на поверхности металла. Подвиды: сварка полуавтоматическая и автоматическая, – ручная сварка в ее классическом понимании здесь отсутствует. Способы эти обеспечивают хорошее перемешивание металла сварочной ванны, что способствует ее очищению от окислов и увеличивает производительность.

Показатели механических свойств металла шва (по сравнению со сваркой неплавящимся электродом) здесь несколько снижаются, что может объясняться перегревом капель металла в дуге и повышенной пористостью металла шва.

Для полуавтоматической сварки применяется проволока малых диаметров (1,2...2,0 мм), при автоматической сварке – 1,2...4,0 мм. Наибольшее распространение получила полуавтоматическая сварка как процесс более универсальный. Для качественного формирования шва необходим правильный выбор параметров режима сварки. Небольшое представление об этом дает график (рис. 9.6). Характер переноса металла в дуге зависит от правильного соотношения таких параметров как сила тока и напряжение на дуге. Так, при достижении некоего критического значения силы тока (своего для каждого диаметра электродной проволоки) перенос приобретает мелкокапельный, так называемый «струйный» характер, что дает стабильное горение дуги и минимум разбрызгивания расплавленной проволоки (1...2%). Конструктивные элементы различных типов сварных соединений предусмотрены ГОСТ 14896-69.

Разделка кромок применяется, начиная с толщин 10,0 мм, при этом часто рекомендуется выполнение соединения на удаляемой медной (или стальной) подкладке. Сварка ведется в чистом аргоне или гелии (или их смесях). Режим сварки для наиболее распространенных сварных соединений приведен в табл. 9.2. Параметры, обеспечивающие надежную защиту при нужной чистоте газа, очень важны. Так, расход газа должен быть оптимален. Малый расход уменьшает устойчивость горения дуги, увеличивает интенсивность окисления и разбрызгивания, ухудшает

формирование шва и ведет к появлению на его поверхности черного налета. Большое значение имеют расстояния от среза газового сопла до изделия и от токоведущего мундштука до среза сопла (рис. 9.7). При их увеличении ослабляется газовая защита (при постоянном расходе газа через сопло) и перегревается электродная проволока, а при уменьшении появляется опасность быстрого засорения сопла брызгами металла и подплавления торца токоведущего мундштука.

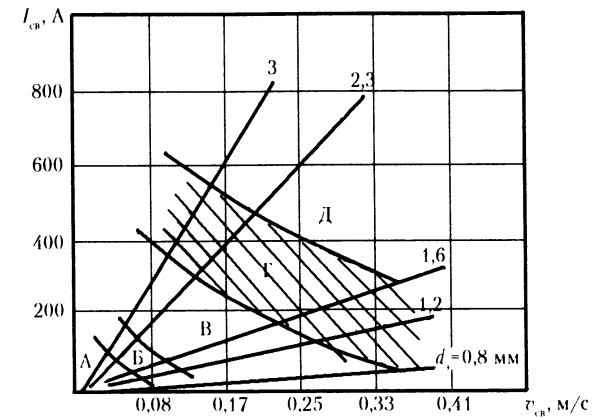


Рис. 9.6. К выбору параметров режима сварки алюминиевых сплавов плавящимся электродом в среде инертных газов:

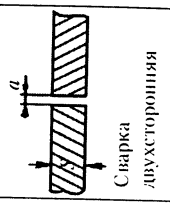
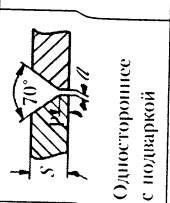
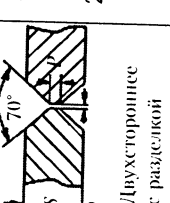
А – область коротких замыканий; Б – область сварки короткой дугой; В – область крупнокапельного переноса; Г – область струйного переноса (наиболее предпочтительна); Д – неустойчивый процесс с сильным разбрызгиванием

Значительное увеличение производительности процесса достигается при использовании импульсно-дуговой сварки. Здесь ощутимо уменьшается нижний предел сварочного тока, благодаря этому расширяются диапазоны рабочих токов с направленным «капельным» переносом металла. Также улучшается стабильность процесса горения дуги и качество формирования шва (возможна сварка в различных пространственных положениях), уменьшается пористость металла шва и снижаются деформации при сварке тонколистовых конструкций.

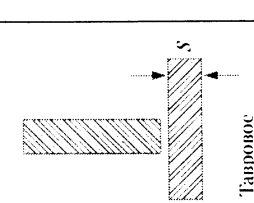
Существенное значение для прочности сварных соединений и их сопротивляемости образованию горячих трещин имеет выбор состава электродной проволоки. В этом смысле полезно введение в ее состав модификаторов (цирконий, титан, бор).

Ориентировочные режимы полуавтоматической аргошно-дуговой сварки алюминиевых сплавов плавающим электродом

Таблица 9.2

Тип соединения	Толщина материала S, мм	Параметры режима						Примечания	
		d_s , мм	$I_{св}$, А	U_d , В	$v_{св}$, м/ч	Скорость подачи проволоки, м/ч	Расход аргона, л/мин		Число слоев
 Сварка двухсторонняя	4...6 8...10	1,6...2,0 1,6...2,0	140...240 260...320	19...22 20...24	20...30 15...30	260...380 300...340	6...10 8...10	2 2	
 Одностороннее с подваркой	8...12	1,6...2,0	240...280	21...25	15...25	260...290	10...12	2...3	Для первого прохода ток и $U_{под}$ по минимуму
 Двухстороннее с разделкой	12...16 20...25	2,0 2,0 2,0	280...360 240...280 340...380	24...28 23...26 23...25	20...25 22...28 25...30	260...380 260...290 340...380	10...12 10...12 12...15	3...4	1-й проход Последний проход

Окончание табл. 9.2

Тип соединения	Толщина материала S, мм	Параметры режима						Примечания	
		d_s , мм	$I_{св}$, А	U_d , В	$v_{св}$, м/ч	Скорость подачи проволоки, м/ч	Расход аргона, л/мин		Число слоев
 Тавровое	4...6 8...16	1,6...2,0 2,0	200...260 270...330	18...22 24...26	20...30 20...25	260...290 260...350	6...10 8...12	1 2...6	

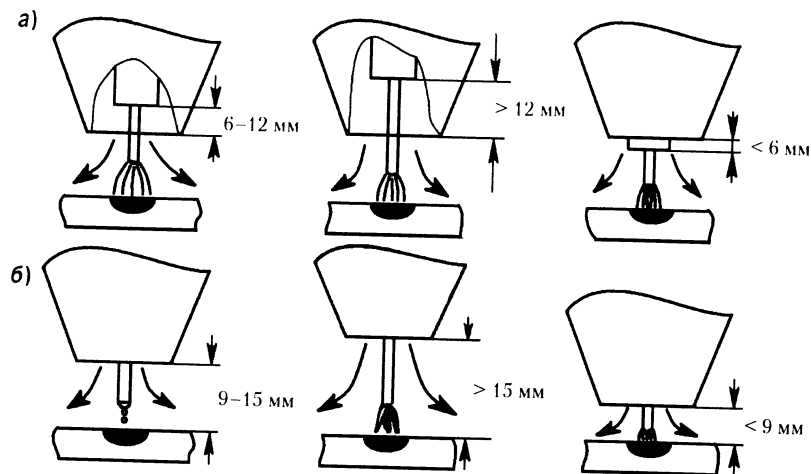


Рис. 9.7. Расстояния от торца токоведущего мундштука до плоскости среза сопла (а) и от среза сопла до изделия (б), оказывающие влияние на качество защиты (на первых рисунках слева – правильное, на остальных – неправильное)

Последнее время находит применение *плазменная сварка*. Она может выполняться сжатой дугой переменного тока или дугой постоянного тока при его обратной полярности. По сравнению с обычной сваркой неплавящимся электродом этот способ позволяет повысить производительность на 50...70%, снизить в 4–6 раз расход аргона и улучшить качество сварных соединений. Эффективный КПД нагрева η_n на переменном токе повышается на 65...70% по сравнению с обычной сваркой неплавящимся электродом. Минимальная погонная энергия здесь имеет место при сварке на постоянном токе при обратной полярности, что делает этот способ привлекательным при сварке нагартованных и термоупрочняемых сплавов. При сварке сжатой проникающей дугой она через кратер проникает на всю толщину свариваемого металла, что способствует эффективной катодной очистке поверхностей.

Существует процесс так называемой микроплазменной сварки, которая выполняется на токах 10...100 А и предназначена для сварки конструкций из сплавов толщин 0,2...1,5 мм. Сварка выполняется на переменном токе с использованием специализированных источников. Способ характерен малыми деформациями свариваемых тонкостенных элементов.

9.4. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ

Титан является ярко выраженным химически активным металлом. Из основных физических свойств чистого титана следует отметить низкую плотность ($4,5 \text{ г/см}^3$) и теплопроводность ($15,1 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$), относительно низкую прочность ($\sigma_{\text{н}} = 245...345 \text{ МПа}$), высокую пластичность ($\delta = 30...50\%$); модуль нормальной упругости E , принимаемый для инженерных расчетов, равен 10800 МПа . Титан немагнитен и обладает высокой коррозионной стойкостью в различных средах, в том числе морской воде. В чистом виде титан, ввиду его относительно невысокой прочности, как конструкционный материал имеет ограниченное применение. Более широко применяются сплавы титана.

В зависимости от системы легирования все сплавы титана делятся на три группы: α -сплавы, α - β -сплавы и β -сплавы. Наибольшее применение в промышленности имеют α -сплавы (и бетированные α -сплавы) и α - β -сплавы. Из широко известных отечественных α -сплавов следует отметить ПТ-3В ($\sigma_s \geq 600 \text{ МПа}$), ПТ-7М ($\sigma_s \geq 400 \text{ МПа}$), ОТ4-0, ОТ4-1, ОТ4 ($\sigma_s \geq 400, 500$ и 600 МПа соответственно). Поставка этих сплавов осуществляется по ГОСТ 19807-74.

Сплавы α -группы получают легированием чистого титана элементами, повышающими стабильность α -фазы (к ним относятся алюминий и олово). Сплавы β -группы легируют элементами, повышающими стабильность β -фазы (к ним относятся хром, марганец, железо, медь, ванадий, молибден, тантал и др.). К α - β -сплавам также относят сплавы комплексного легирования, содержащие при комнатной температуре α - и β -фазу. Практически все α -сплавы не упрочняются термической обработкой. Упрочнение же α - β -сплавов осуществляется термообработкой, эффект которой тем выше, чем больше в сплаве содержится β -фазы. Для сварных конструкций наиболее приемлемы α -сплавы титана либо α - β -сплавы с относительно невысоким содержанием β -стабилизатора.

Такие сплавы, наряду с высокой удельной прочностью, немагнитностью и высокой коррозионной стойкостью во многих средах, обладают хорошей свариваемостью и, как правило, не требуют последующей термической обработки.

Рассматривая особенности свариваемости титана и его сплавов, необходимо отметить следующие.

- 1 Высокая химическая активность металла при его нагреве и расплавлении приводит к значительному поглощению им кислорода, азота и водорода. Предел растворимости кислорода в титане составляет (14,5% масс.), в жидком титане он может раствориться до

2...6% O₂. Увеличение содержания кислорода в металле до 1% переводит его в совершенно хрупкое состояние; при охлаждении он самопроизвольно растрескивается. Кроме этого, металл будет продолжать окисляться в процессе охлаждения в твердом виде и будет покрываться хрупкой пленкой окислов. Поэтому одной из основных задач при сварке титана является организация надежной защиты нагретых и расплавленных зон от проникновения к ним газов воздушной атмосферы. Такой защите должна подвергаться область металла в районе сварки, нагреваемая от температуры 500 °С и выше (рис. 9.8).

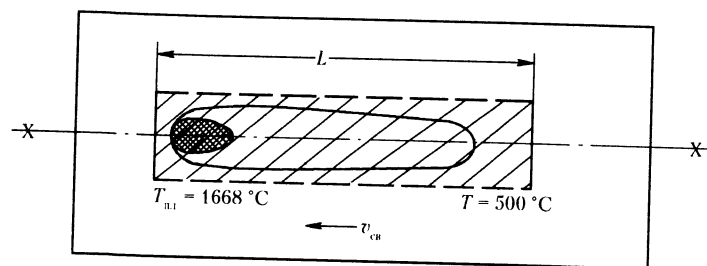


Рис. 9.8. К площади зоны газовой защиты при сварке титановых сплавов

- Второй трудностью, органично связанной с первой, является наличие в основном металле (и в присадочной проволоке) вредных примесей: кислорода, азота и водорода. Эти примеси отрицательно влияют на пластичность металла (уменьшая ее) и прочностные его характеристики (увеличивая их). Иными словами, увеличение содержания таких примесей как кислород и азот значительно охрупчивают металл, а водород может приводить к замедленному его разрушению. Поэтому содержание указанных вредных примесей в свариваемых сплавах и в сварочных проволоках строго нормируется. Так, для технического чистого титана марки ВТ-1 содержание кислорода составляет до 0,15%, азота до 0,05%, углерода до 0,1% и водорода до 0,01%. Еще большие ограничения существуют для электродной (присадочной) проволоки из технического чистого титана: кислорода не более 0,12%, азота не более 0,04% и водорода не более 0,0025% (такое содержание водорода достигается вакуумной дегазацией проволоки).
- Водород в условиях сварки даже при его низком содержании в сплаве и присадочном металле может диффузионно перемещаться и образовывать зоны повышенной концентрации в

районе линии сплавления (особенно в случае, когда химические составы основного и присадочного металла различны). Это ведет к разнице пределов растворимости в них водорода. С количеством содержания газов в металле шва (в первую очередь, водорода) связывают возможность появления в нем газовой пористости. Характер растворения водорода в титане с изменением температуры (по сравнению с другими металлами) имеет свою специфику (с повышением температуры оно уменьшается вплоть до температуры плавления; при ее достижении существует скачок увеличения растворимости, затем растворимость опять уменьшается). Поэтому выделение водорода из ванны может иметь место тогда, когда его содержание в жидкой фазе существенно превышает растворимость водорода в твердой фазе при температуре кристаллизации. Это наблюдается при высоком содержании водорода (паров воды) в газовой фазе, на поверхности кромок или сварочной проволоки либо при большом времени пребывания ванны в жидком состоянии. В последнем случае усиливается процесс порообразования за счет выделения нерастворимых в титане паров воды, гидроокислов и окислов углерода, которые образуются из-за взаимодействия окислов титана с водородом.

- Низкая теплопроводность титана приводит к тому, что изотермы вдоль шва вытягиваются, а это делает необходимым увеличение зоны защиты, особенно при сварке на высоких погонных энергиях (см. рис. 9.8). Одновременно это приводит к уменьшению ширины ЗТВ. Коэффициенты теплопроводности и термического расширения у титана невелики, однако, несмотря на это сумма остаточных укорочений по сравнению со сталью практически не уменьшается, так как усредненный коэффициент $\frac{\alpha}{\epsilon_p}$ зависит от объемной теплоемкости, а она у титана примерно в 1,5 раза меньше, чем у низколегированной стали. Поэтому при сварке титановых конструкций необходимо принимать те же меры по борьбе с деформациями, что и при сварке стальных конструкций; особенно эффективным здесь является способ создания пластических деформаций металла шва.
- Удельное электрическое сопротивление титана почти в 1,6 раза больше, чем у алюминия и почти в 4 раза больше, чем у железа. Поэтому при механизированной сварке плавящимся электродом его вылет должен быть значительно меньше.

6. α -сплавы (и бетированные α -сплавы), как правило, имеют хорошую свариваемость. Увеличение количества β -стабилизатора (например, ванадия) приводит к увеличению чувствительности металла ЗТВ к термическому циклу сварки, что определяется характером фазовых превращений в сплаве. При малых скоростях охлаждения увеличение зерна в металле ЗТВ идет с повышением содержания ванадия. Увеличение скоростей охлаждения приводит к уменьшению степени различия в величине зерна вне зависимости от содержания ванадия в металле. При его большом содержании игольчатая структура, выделяющаяся при охлаждении α -фазы, более груба. Увеличение погонной энергии сварки приводит к уменьшению скоростей охлаждения и увеличению времени выдержки при температурах выше критической. Оба фактора способствуют росту зерна в металле зоны. На рис. 9.9 показано влияние погонной энергии на рост зерна в ЗТВ и изменение вязких и прочностных свойств металла ЗТВ для бетированного α -сплава марки ПТ-ЗВ: значительное изменение величины погонной энергии практически не влияет на изменение твердости. Ударная вязкость закономерно снижается с увеличением поперечника зерна, однако остается выше нижних значений ее по стандарту. Это дает основание считать α -сплавы титана (в том числе и бетированные) термически вялыми и хорошо свариваемыми во всем диапазоне погонных энергий (от ручной сварки до электрошлаковой).

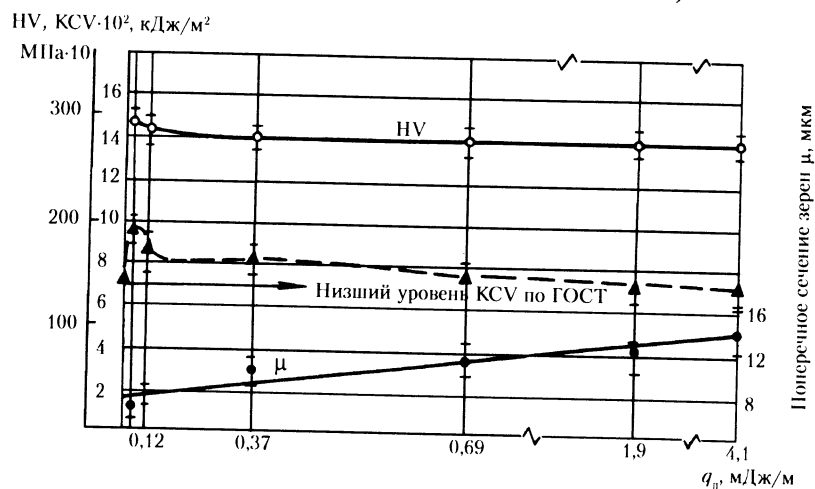


Рис. 9.9. Влияние погонной энергии сварки на изменение свойств сплава ПТ-ЗВ в ЗТВ

Если в сплаве при комнатной температуре присутствует β -фаза, то высокие скорости охлаждения металла могут приводить к увеличению степени его охрупчивания при больших скоростях нагружения и присутствии концентратора напряжений. Это можно объяснить спецификой растворения водорода в сплаве такой системы легирования при его охлаждении. При достаточном его содержании в металле возникают крупные колонии пластинок гидридной фазы (TiH_x), расположенные по границам α -фазы. Если сплав не имеет β -стабилизатора, то увеличение скоростей охлаждения повышает ударную вязкость металла, а в структуре наблюдается выделение дисперсных гидридных пластинок по границам α -фазы. Предел растворимости водорода в β -фазе выше, чем в α -фазе, однако из-за выделения гидридных пластинок и повышения чувствительности металла ЗТВ к охрупчиванию при различного рода нагрузках содержание водорода в α - и α -бетированных сплавах рекомендуется ограничивать до 0,006%.

7. Сплавы системы $\alpha+\beta$ -легирования при сварке обладают определенной спецификой. В условиях резкого охлаждения при небольшом количестве β -стабилизаторов в металле ЗТВ будет иметь место α -структура. При увеличении содержания β -стабилизаторов выше определенного предела в металле наряду с α -фазой начинает фиксироваться и β -фаза. Поэтому свариваемость этой группы сплава напрямую зависит от содержания в сплаве β -стабилизаторов. Так, если сплав содержит более 5% β -стабилизаторов, то в металле зоны термовлияния наблюдается конгломерат фаз ($\alpha'-\beta-\omega$), что ведет к увеличению хрупкости. Поэтому для улучшения свойств сварных соединений необходимо производить после сварочную термическую обработку конструкции (нагрев до 750...800 °С, охлаждение с печью до 550 °С и далее на воздухе). Скорости охлаждения металла в ЗТВ (а значит и режимы сварки и подогрева) должны выбираться так, чтобы получить в ней структуры с максимальной пластичностью (рис. 9.10). Высокие скорости охлаждения приводят к образованию мелкодисперсной хрупкой α' -фазы. Снижение скорости охлаждения дает более пластичный металл со смесью α - и α' -фазы. Очень медленное охлаждение приводит к росту зерна β -фазы с образованием крупнозернистой α -фазы. Поэтому наилучшим, но и наиболее сложным будет термический цикл, выдержанный в соответствии с кривой 4 (см. рис. 9.10).

Особенности газовой защиты при сварке титановых сплавов. Учитывая высокую химическую активность титана и его сплавов, основным способом сварки этих материалов является дуговая сварка плавящимся и неплавящимся электродом в среде инертных газов. Зонами

защиты здесь является не только сварочная ванна, но и область нагретого до 500 °С металла шва и ЗТВ.

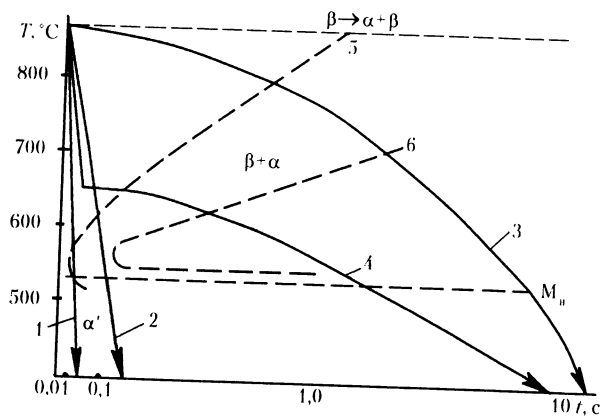


Рис. 9.10. Диаграмма анизотермического превращения в α - β -титановых сплавах: 1–3 – скорости охлаждения по мере их уменьшения; 4 – рекомендуемый термический цикл при сварке; 5, 6 – начало и конец превращения соответственно

При струйной защите* зона расплавленного металла защищена газом, истекающим из сопла горелки, а остывающий металл шва – газом, истекающим из специальной приставки, соединенной с горелкой (рис. 9.11).

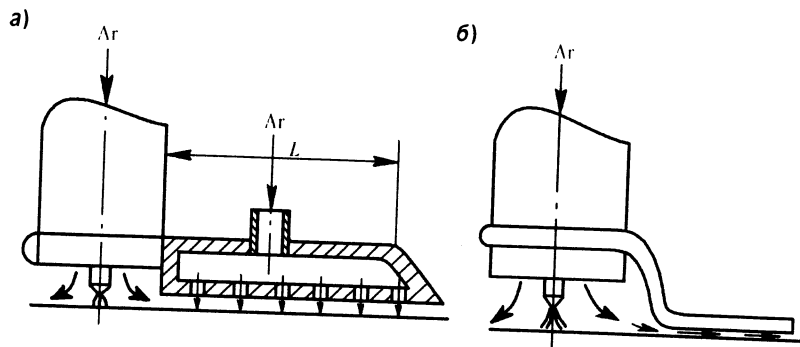


Рис. 9.11. Схемы газозащитных приспособлений при сварке титана:

a – сопло горелки с дополнительной подачей газа в приставку для защиты остывающего шва; *b* – сопло горелки с газозащитной приставкой, не использующей поток газа из основного сопла

* Вопросы защиты в установках с контролируемой средой рассмотрены ранее (см. рис. 2.21).

Длина приставки L зависит от режимов сварки и при ее выполнении на больших токах может достигать 500 мм (автоматическая сварка). Качественная защита обеспечивается при высокой чистоте газа (не менее 99,99%); при этом поток истекающего газа в зоне защиты должен иметь концентрацию, равную исходной на срезе сопла горелки.

Сварка химически активных материалов должна производиться только в зоне потенциального ядра струи со свободным ламинарным пограничным слоем. Относительно невысокая эффективность (расстояние между срезом сопла и ванны, при котором обеспечивается качественная защита жидкого металла) околшовной зоны при струйной защите на широко распространенных в промышленности горелках объясняется неоднородностью профиля скоростей и высокой турбулентностью потока на плоскости среза сопла. Увеличить расстояние от среза сопла до ванны с обеспечением качества защиты до величины $1,5D_{\text{сопла}}$ можно, применив сопла в виде конуса с телесным углом раскрытия и конечной цилиндрической частью, имеющей длину порядка диаметра сопла (рис. 9.12).

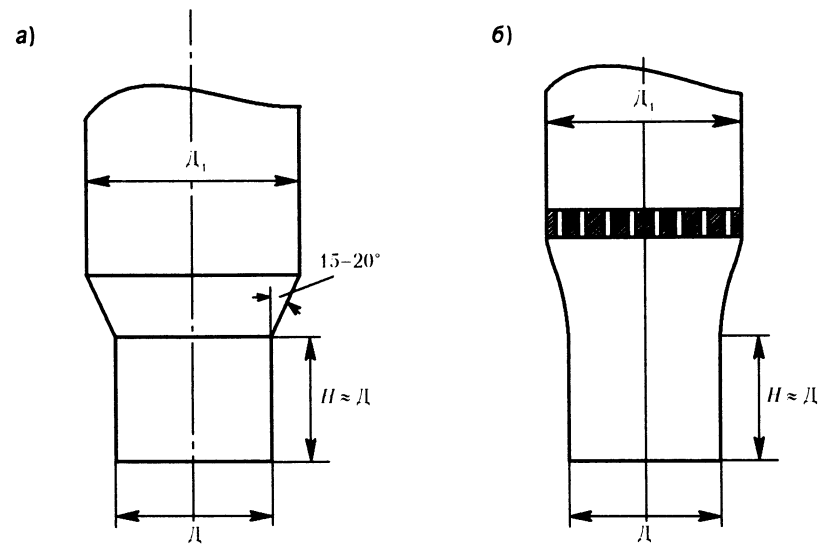


Рис. 9.12. Варианты конструктивного оформления сопел горелок: *a* – цилиндрическое; *b* – выполненное по кривой Витошинского

При наличии поперечных сносящих потоков воздуха (сквозняков) следует пользоваться специальными конфузурными соплами, проточная

часть которых выполнена по кривой Витошинского; она плавно сочетается с цилиндрической частью сопла. В цилиндрической части такого сопла установлена мелкая сетка, предназначенная для гашения турбулентного потока газа и увеличения длины ядра за конфузуром при больших скоростях его истечения.

Высокая химическая активность титановых сплавов предъявляет к технологическим процессам изготовления конструкций ряд специфических общих требований. К ним относятся:

- отсутствие сквозняков в помещениях для сварки, чистота рабочих мест для сборки и сварки конструкций, отсутствие запыленности, возможность мокрой уборки, наличие стабильно работающей общеобменной вентиляции;
- необходимость тщательной зачистки сварочных поверхностей, присадочной и электродной проволоки от органических и неорганических загрязнений (иногда с применением специальной технологии травления, мойки и сушки);
- проведение входного контроля основного материала присадочной и электродной проволоки и инертных газов на соответствие содержания вредных примесей поставочной технической документации (кислорода, азота и водорода);
- тщательная механическая обработка кромок деталей после кислородной или плазменной резки [удаление окисленных (альфированных) слоев на глубину 1,5...3,0 мм].

При наличии приставки в горелках для ручной сварки расход в нее инертного газа составляет примерно 1/3 расхода в сопле горелки. Этот способ рационально применять во всех пространственных положениях в толщинах до 18...20 мм.

Сварка производится на постоянном токе прямой полярности. Соединения малых толщин (до 2,0...5,0 мм) выполняются без разделки кромок с односторонним или двухсторонним формированием шва. В первом случае стыковые соединения толщиной до 8 мм, как правило, выполняются на подкладке. При сварке, во избежание окисления, производится поддув инертным газом (табл. 9.3) для защиты обратной стороны формирующегося шва. Установки для сварки должны предусматривать аппаратуру, обеспечивающую пуск газа за 15...40 с до включения тока (продувка газовых магистралей) и выключение газа через 30...150 с после выключения тока (для защиты газом охлаждающегося металла).

Одной из установок для этого вида сварки является ПРС-3М, позволяющая производить сварку неплавящимся электродом во всех пространственных положениях на токах до 500 А с регулировкой тока

через 50 А. Подача присадки может быть в принципе механизирована (проволоки диаметром 1,2...1,6 мм).

Автоматическая сварка титановых сплавов может производиться неплавящимся и плавящимся электродом. В большинстве случаев предпочтение следует отдавать первому способу, так как он обеспечивает более стабильный процесс горения дуги, практически без разбрызгивания, и способствует получению плотных, беспористых сварных швов с хорошим их формированием. Процесс сварки плавящимся электродом ведется на больших токах и в ряде случаев имеет большую производительность, нежели процесс сварки неплавящимся электродом. Большие силы токов, применяемые уже при сварке листов толщиной 20...40 мм, приводят к значительному увеличению зон защиты металла, нагреваемого до температур 550...600 °С. Это требует применения приставок для защиты ванны и остывающего металла достаточно больших размеров. Это же относится и к приспособлениям для поддува газа с целью защиты обратной стороны свариваемого соединения.

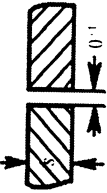
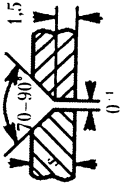
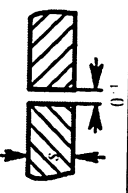
Сварка может производиться как без разделки кромок, так и с их разделкой (в зависимости от толщины свариваемого металла). При обычно применяемых режимах (без разделки кромок) рекомендуется производить сварку (табл. 9.3) до толщин 20...22 мм. В принципе, эта толщина может быть увеличена, но тогда нарушается формирование усиления, и оно требует трудоемкой отделки ручной аргонодуговой сваркой. С толщины 22 мм целесообразно производить разделку кромок и применять многопроходную сварку на средних по току режимах. Разделка имеет обычный вид (односторонняя или двухсторонняя со скосом кромок), и лишь притупление у нее по сравнению с разделкой для ручной сварки увеличивается в 2–2,5 раза. При этом (несмотря на определенное увеличение трудоемкости) улучшается формирование и уменьшается вероятность образования дефектов типа газовых включений.

При плавящемся электроде при сварке даже на спокойных режимах не удается получить плавного перехода усиления к основному металлу, поэтому требуется проведение операции ручной отделки. Для сварки применяются специально спроектированные для этой цели автоматы. В качестве источников питания используются сварочные выпрямители с жесткой характеристикой. При одних и тех же токах при изменении защитной среды меняются параметры режима сварки. Это объясняет изменение формы проплавления из-за отличия физических свойств аргона и гелия.

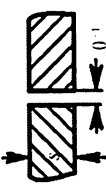
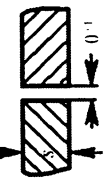
Автоматическая сварка неплавящимся электродом также может производиться и в аргоне и в гелии погруженной и поверхностной дугой.

Таблица 9.3

Примеры назначения режимов в инертных газах стыковых соединений титановых сплавов

Свариваемая толщина, S, мм	d_3^W , мм	$d_{пр}$, мм	Эскиз разделки кромок	Сила тока, А	Напряжение на дуге, В	Скорость сварки, м/ч	Расход аргона, л/мин
Ручная сварка вольфрамовым электродом							
2-4	4,0	1,5-2,0		$\frac{90-140}{60-100}$ *	10-12	12-16	8-10
4-10	4,0	2,0		130-140 (S = 4 мм) 160-240 (S = 10 мм)	10-14	5-8	10-15
20-24	12,0	-		800-850**	15-16	12-14	$\frac{15-20}{15-30}$ ***

Окончание табл. 9.3

Свариваемая толщина, S, мм	d_3^W , мм	$d_{пр}$, мм	Эскиз разделки кромок	Сила тока, А	Напряжение на дуге, В	Скорость сварки, м/ч	Расход аргона, л/мин
Механизированная сварка плавящимся электродом без разделки кромок							
3-8	-	1,6		350-450	$\frac{28-36}{22-28}$ ****	25-35	$\frac{30-40}{20-30}$
16-36	-	5,0		780-1200	$\frac{45-52}{34-38}$	40-50	$\frac{100-120}{50-60}$

Примечания:

- * В числителе – нижнее положение, в знаменателе – вертикальное.
- ** Механизированная сварка погруженной дугой.
- *** В числителе – расход газа в горелку, в знаменателе – в приставку.
- **** В числителе – при сварке в гелии, в знаменателе – в аргоне.

Погруженной дугой без присадки можно сваривать за один проход толщины до 20 мм. Принцип погруженной дуги заключается в следующем. Вольфрамовый электрод укреплен на каретке автомата, движением которой управляет механизм, прямо связанный с напряжением на дуге. Перед сваркой устанавливается нужное напряжение на дуге. По мере образования сварочной ванны дуга удлиняется, и специальной электрической схемой включается механизм, стремящийся восстановить заданное напряжение на дуге. Вольфрамовый электрод двигается вниз, и дуга, углубляясь, погружается в сварочную ванну – это и приводит к увеличению глубины проплавления. В процессе сварки дуга отклоняется в сторону, противоположную стороне сварки, и это ограничивает глубину проплавления.

При редко возникающей необходимости сварки толщин более 25...40 мм производится разделка кромок. Такое соединение может свариваться следующим образом: сначала выполняется сварка погруженной дугой притупления большой величины, а разделка заполняется с помощью поверхностной дуги с подачей присадочной проволоки. При непроваре кромок за счет усадки при высокой температуре происходит такое сдавливание кромок, что наступает их частичное схватывание (термодиффузионная сварка), и рентгенопросвечивание может не обнаружить дефект.

В качестве вольфрамового электрода используется иттрированный вольфрам в прутках диаметром 8,0...10,0 мм.

После сборки соединения (таврового или стыкового), перед сваркой, с другой стороны выполняется консервационный проход ручной или автоматической сваркой.

При автоматической сварке неплавящимся электродом могут образовываться дефекты, характерные для всех видов сварки; в ряде же случаев возникают дефекты, характерные только для этого метода. Появление цветов побежалости от соломенно-желтого до серого говорит о нарушении защиты инертным газом через приставку. Матовый цвет, морщинистый вид шва, белого или желто-бурого цвета налет с характерными цветами поверхности кратера вызывается нарушением газовой защиты через горелку. Неудовлетворительное формирование шва (грубочешуйчатое с подрезами) является следствием нарушения стабильности плавления основного металла и присадочной проволоки из-за увеличения сварочного тока сверх допустимого предела, уменьшения скорости сварки или неравномерной подачи присадки. Следует отметить, что при сварке неплавящимся электродом (в случае номинальных режимов) формирование шва исключительно стабильно, усиление имеет гладкую поверхность с плавными переходами к основному

металлу. Поверхностные трещины имеют место при сильных окислениях. Возможной причиной может быть также попадание в шов меди ввиду оплавления сопла горелки. Непровар получается при малой силе тока, высоком напряжении на дуге, большой скорости сварки, использовании вольфрамового электрода с неправильной геометрией заточки. Вольфрамовые включения могут появляться при заниженных напряжениях дуги, неполадках в системе регулирования дуги и нарушениях защиты.

Сварка титановых сплавов возможна *под слоем специальных бескислородных флюсов системы $\text{CaF}_2\text{-BaCl}_2\text{-NaF}$* (соли редкоземельных элементов). Здесь защита жидкого металла сварочной ванны осуществляется парогазовым пузырем, образуемым дугой при плавлении флюса и металла. Однако способ этот может применяться для сварки относительно небольших толщин (до 12,0 мм). При увеличении погонной энергии, объема металлической жидкой ванны и времени ее существования наблюдается диффузия газов воздушной атмосферы через слой флюса и шлака, насыщение кислородом металла шва и, как результат, потеря его пластичности. По этим же причинам, ввиду совершенно неудовлетворительной защиты, не применяются покрытые плавящиеся электроды для ручной сварки.

Электрошлаковая сварка титана, как и стали, эффективна для толщин более 40 мм. Сварка производится под бескислородными флюсами типа АНТ-46 с обязательной защитой зеркала шлаковой ванны аргоном (во избежание диффузии через шлак вредных газов из атмосферы). Желательно использовать электроды большего сечения (пластинчатые и плавящиеся мундштуки), проволоку большого сечения (5,0 мм), что связано с высоким электросопротивлением титана. Ввиду высокой жидкотекучести фторидных флюсов особые требования предъявляются к водоохлаждаемым ползунам (прилегание к поверхности листов с зазором не $>0,5$ мм).

Промышленные α -, псевдо α - и низколегированные $\alpha+\beta$ -сплавы хорошо свариваются ЭШС; несмотря на крупнокристаллическую мартенситоподобную структуру, при сварке на оптимальных режимах это не ведет к сколь-либо значительному изменению свойств металла шва и ЗТВ.

При сварке высокопрочных двухфазных $\alpha+\beta$ -сплавов часто необходимо подбирать оптимальный химический состав шва, отличающийся от основного металла. В ряде случаев приходится прибегать к последующей термообработке. Так, появление в металле ЗТВ субзерненной структуры может быть устранено длительным отжигом (750 °С для сплава ВТ22). При этом равномерно выделяется мелкодисперсная α -фаза (продукт распада β -фазы) и восстанавливается вязкость металла.

Плазменно-дуговая сварка титана и его сплавов без разделки кромок возможна до толщин 16,0 мм. При сварке стыковых соединений проникающей сжатой дугой на постоянном токе до 500 А проплавление имеет характер «замочной скважины». Сварка может производиться как без присадочной проволоки (сварка без разделки), так и с разделкой (тогда в переднюю часть ванны вводится присадочная проволока).

При микроплазменной сварке (толщины $\leq 1,5$ мм) процесс ведется дугой прямого действия, горящей на постоянном токе прямой полярности (≤ 200 А). В качестве плазмообразующего газа во всех случаях используется гелий или его смесь с аргоном. На слоботочных плазмотронах электроды изготавливают из вольфрама (марки ВЛ или ВИ), на сильноточных плазмотронах с высокой тепловой нагрузкой требуется применение специальных водоохлаждаемых электродов.

Электронно-лучевая сварка титана, как и других материалов, характеризуется жесткими требованиями к сборке под сварку и строгим соблюдением заданных зазоров. Иногда у торцов свариваемых кромок необходимы технологические утолщения, которые удаляются после сварки. Техника ЭЛС при сварке титановых сплавов не отличается от таковой при сварке других металлов.

Трудно выбрать режимы ЭЛС, обеспечивающие отсутствие подрезов. Одним из приемов здесь является двухпроходная сварка, когда второй проход «разглаживает» неудачное формирование лучом, колеблющимся поперек шва.

Одним из основных дефектов при ЭЛС является пористость металла шва. Она располагается либо в металле шва, либо вблизи линии сплавления. Меры борьбы – отсутствие влаги и жировых загрязнений на поверхности и оптимальные условия вакуумирования.

Высокая концентрация энергии в луче способствует уменьшению ширины ЗТВ. Крупное зерно в ЗТВ при сварке двухфазных $\alpha + \beta$ -сплавов может привести к падению ударной вязкости; отжиг таких соединений практически ее восстанавливает.

9.5. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ТУГОПЛАВКИХ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ МЕТАЛЛОВ

В различных отраслях промышленности (в том числе в судовом машиностроении, энергетике и приборостроении) достаточно широко в качестве конструкционных материалов используют цирконий, гафний, ниобий, тантал, молибден, реже ванадий и вольфрам.

Основными затруднениями при сварке этих металлов и их сплавов является большое сродство к газам: азоту, кислороду и водороду, – что

приводит к понижению свойств, росту зерна при нагреве и высоким температурам плавления (так, температура плавления гафния 5400, тантала 5300, вольфрама 5900, молибдена 4830 °С).

Цирконий имеет две аллотропические модификации (как и титан), обладая полиморфностью при сварке в ЗТВ, дает закалку с появлением β -фазы в структуре. Интенсивно поглощает водород в диапазоне 300...1000 °С с образованием гидрида ZrH_2 , а при нагревах выше 800 °С энергичное взаимодействие с азотом приводит к образованию нитридов ZrN . Сплавы циркония с оловом, железом, никелем и хромом имеют высокую коррозионную стойкость при прочности выше 400 МПа.

Гафний также испытывает полиморфные превращения с низкотемпературной α - и высокотемпературной β -фазами. При нагревах он активно взаимодействует с воздушной атмосферой, образуя нитриды и двуокись.

Ниобий и тантал близки по своим физическим свойствам и полиморфных превращений не имеют. Обладая высокой стойкостью в жидких металлах-теплоносителях, применяются в отдельных типах реакторов. Высокая коррозионная стойкость тантала используется также в хирургии. Находят применение сплавы тантала с вольфрамом, ниобием и ванадием и сплавы ниобия с добавлением молибдена, вольфрама, циркония, ванадия, титана.

Все металлы этой группы энергично взаимодействуют с газами воздушной атмосферы при нагреве (выше 300 °С начинается их взаимодействие с кислородом, выше 350 °С – с водородом, выше 400 °С – с азотом). В результате этого взаимодействия резко падает пластичность металла и растет его прочность; причиной этому является образование окислов, нитридов и гидридов. При сварке в металле шва и ЗТВ могут образовываться (при наличии примесей углерода) карбиды, которые наряду с ростом зерна могут приводить к охрупчиванию металла.

Молибден не имеет полиморфных превращений; имея высокую температуру плавления и показатели механических свойств, используется для отдельных деталей турбокомпрессоров, камер сгорания и т. д. При сварке склонен к появлению горячих трещин из-за образования легкоплавких эвтектик и охрупчиванию из-за насыщения атмосферными газами, чувствительность к которым у него чрезвычайно велика. Так, влияние кислорода на изменение перехода металла в хрупкое состояние ощущается довольно заметно уже при содержании его в металле более 0,0002% (T_{xp} повышается до 200 °С).

Термический цикл сварки приводит к росту зерна в ЗТВ и резкому охрупчиванию металла из-за утолщения межзеренных прослоек и обогащения их примесями. Возможно также образование пор в металле шва,

если в металле есть примеси углерода. Отсюда возникают весьма жесткие требования к чистоте основного и сварочных материалов (содержание кислорода $<0,0002\%$, азота $<0,0001\%$, углерода $<0,003\%$) с введением в ванну активных раскислителей (титана, циркония, селена) и применением при сварке минимальной погонной энергии.

Хорошей свариваемостью обладают гафний, ниобий, тантал и цирконий. Сварка же вольфрама и молибдена вызывает значительные трудности из-за охрупчивания металла вследствие его особой чувствительности к примесям. Поэтому часто требуется введение в технологический процесс подогрева до температур $200...300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и снятие остаточных сварочных напряжений (отпуск после сварки), что снижает вероятность образования холодных трещин. Учитывая эти особенности, ручную сварку с применением струйной защиты используют редко (с горелками, обеспечивающими двойную защиту, и приспособлениями для поддува обратной стороны). Для уменьшения загрязнений металла шва сварку часто ведут без подачи присадочного металла. Однако все эти меры не дают возможности получить равнопрочное сварное соединение. Лучшие результаты дает применение ЭЛС.

10. ОСОБЕННОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ НАПЛАВОЧНЫХ РАБОТ

10.1. ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ НАПЛАВКА

Электродуговая наплавка широко применяется в различных отраслях современной промышленности в двух основных случаях.

1. С целью восстановления изношенных во время эксплуатации машин и механизмов деталей. По сути, эта операция относится к ремонтным работам и позволяет иногда надолго продлить сроки эксплуатации изделия без больших затрат на изготовление (приобретение) новой детали. Обычно (но далеко не всегда) наплавку ведут металлом того же химического состава, что и металл детали. Этот способ, как правило, применяют для восстановления исходных размеров детали.
2. Для наплавки слоев с особыми свойствами на поверхность деталей, которые с целью экономии изготавливают из обычных конструкционных сталей.

Как правило, химический состав наплавляемых материалов резко отличается от химического состава металла детали, что диктуется теми свойствами, которые должен иметь поверхностный слой. Окончательный химический состав наплавленного слоя зависит также от доли участия расплавленного (нелегированного) основного металла. Чем меньше эта доля, тем меньшие изменения происходят в наплавленном слое, сохраняя состав его (а значит и свойства) в состоянии, близком к исходному. Здесь возникает одно из основных требований, предъявляемых ко всем способам дуговой наплавки, – они должны обеспечивать минимальное проплавление основного металла детали.

Толщина наплавляемого слоя может быть различной и колебаться в пределах $0,5...10,0\text{ мм}$. При большой толщине наплавляемого слоя наплавка выполняется многослойной; в этом случае получить исходный состав последнего слоя наплавки проще из-за все уменьшающейся доли участия металла предыдущего слоя в последующем.

Доля участия основного металла в наплавляемом зависит от принятого способа наплавки и параметров ее режима. Электродуговые способы наплавки различаются между собой характером теплового воздействия на основной металл. Практически, для различных металлов и характера наплавляемых деталей могут быть применены различные способы дуговой наплавки: газовая, ручная штучным электродом, автоматическая и

полуавтоматическая под флюсом или в среде защитных газов, плазменная или электрошлаковая. При этом может применяться дуга прямого или косвенного действия. Каждый способ имеет свои диапазоны изменения доли участия основного металла в наплавленном слое (рис. 10.1). На долю участия основного металла в металле наплавки влияют и другие факторы (например, температура плавления, теплофизические свойства основного металла, его масса, применение сопутствующего подогрева).

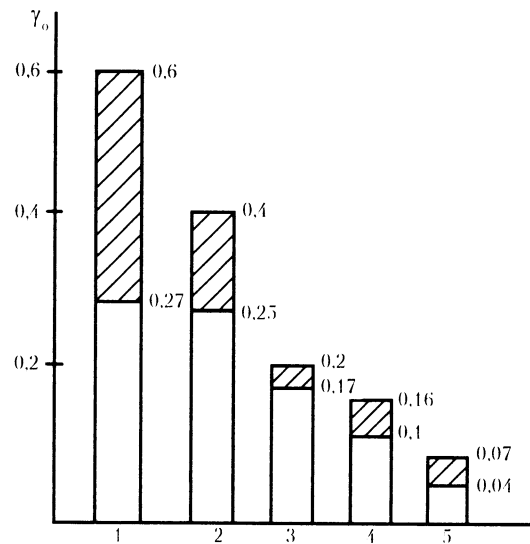


Рис. 10.1. Доля участия основного металла в первом слое наплавки, выполненной различными способами (сталь хромоникелевая):

- 1 – автоматическая под флюсом; 2 – ручная покрытыми электродами;
- 3 – автоматическая под флюсом с дополнительной присадочной проволокой;
- 4 – автоматическая под флюсом ленточным электродом;
- 5 – плазменной дугой с токоведущей проволокой

Как правило, для получения поверхностного слоя с особыми, нужными для эксплуатации свойствами требуется вводить в наплавленный металл довольно большое количество легирующих элементов. Это удается сделать, применяя следующие материалы.

1. Порошковые проволоки (или ленты). Они позволяют вводить в наплавленный металл 40...70% легирующих элементов (от массы

основной проволоки) и сейчас широко применяются для создания наплавленных слоев с практически любыми свойствами во многих отраслях мировой промышленности. Это объясняется относительной простотой создания нужной по химическому составу металлопорошковой среды – наполнителя проволоки или ленты. В зависимости от состава такая шихта обеспечивает применение при наплавке проволоки (ленты) либо без защиты, либо под флюсами (в основном нейтральными) или в среде инертных газов или их смесей.

2. Углеродистые или легированные проволоки, холоднокатаные ленты в сочетании со слабоокислительными плавящими или керамическими флюсами. В последнем случае возможно также применение легированных керамических флюсов в сочетании с малолегированной проволокой или лентой. В этом варианте через флюс в наплавленный металл можно ввести до 35% легирующих элементов.
3. Дополнительные легирующие элементы, вводимые через порошок или присадочную проволоку. В первом случае порошок нужного состава засыпается на наплавляемую поверхность, а во втором присадочная проволока, подключенная в сварочную цепь, вводится в дугу. Уменьшая количество расплавляемого металла, этот способ одновременно уменьшает разбавление наплавляемого металла основным за счет уменьшения доли его участия в наплавленном.

Большое влияние на химический состав наплавленного металла при всех способах наплавки оказывает режим наплавки (особенно это заметно при наплавке под слоем флюса, что связано с увеличением глубины проплавления и количеством расплавляемого флюса). Здесь целесообразно применение ленты, что уменьшает глубину проплавления основного металла, увеличивает производительность наплавки, создает более ровную наплавляемую поверхность.

Ленты поставляются в холоднокатаном виде толщиной 0,4...4,0 мм и шириной 20...100 мм. Изготавливаются и металлопорошковые ленты различных химических составов. Наплавка лентами, как правило, производится под флюсом на автоматах, оборудованных специальными подающими ленту механизмами.

Естественно, что ручная наплавка обладает значительно меньшей производительностью (0,5...2,0 кг/ч), химический состав наплавленного металла при этом способе во многом зависит от режима наплавки (с увеличением силы тока и напряжения на дуге усиливается выгорание легирующих элементов).

Вообще через покрытие можно обеспечить довольно значительное легирование наплавляемого металла. Поэтому, варьируя составом покрытия и составом стержня, можно получить множество композиций наплавленного металла с различными свойствами. Существует большое количество типов и марок электродов, обеспечивающих на деталях из различных марок сталей наплавку слоев с необходимыми свойствами. Так, для наплавки низкоуглеродистых, углеродистых и низколегированных сталей на деталях без термической обработки (или нормализованных) могут применяться электроды марок ОММ-5, ЦН-7, УОНИ 13/45. Они обеспечивают твердость наплавленного металла HB 200...242. Для деталей из сталей среднеуглеродистых и углеродистых, прошедших нормализацию, могут применяться электроды марок Т590, Т620, 12КН-ЛИВТ. Эти электроды обеспечивают высокую твердость наплавленного слоя без последующей термообработки наплавленной детали (HRC52-56).

При наплавке в углекислом газе нужно учитывать потерю легирующих элементов за счет их окисления образующимся кислородом. В случае наплавки в инертных газах (или их смесях) легирование осуществляется за счет применения проволок сплошного сечения (либо порошковых проволок), а также дополнительных проволок (вводимых в дуговое пространство либо укладываемых на наплавляемый металл), порошков или паст нужного состава.

На проволоку сплошного сечения существует ГОСТ 10543-75. Он содержит 30 марок проволок для наплавки различного химического состава и назначения. Наплавляемый металл этими проволоками имеет разную твердость в соответствии с требованиями эксплуатации (табл. 10.1). В странах Западной Европы (в частности, в Германии) существует гораздо больше марок проволоки для наплавки (в том числе и порошковых), обеспечивающих широкий спектр их применения в различных отраслях промышленности.

В этом случае в проволоке (или порошке) часто находится большое количество углерода в виде карбида, что наряду (иногда) с широким комплексом других легирующих приводит к усложнению технологии наплавки применением сопутствующего подогрева и последующей после наплавки термообработки (закалкой с отпуском либо отпуском – в зависимости от химического состава наплавки и основного материала детали). Так, применяемая для наплавки гребных винтов и валов морских судов проволока Нп-30Х10Г10Т дает твердость наплавленного металла HB 200...220 и не требует последующей термической обработки, а проволока Нп-40Х2Г2М применяется для наплавки деталей машин, работающих с динамическими нагрузками (коленчатые валы и др.), дает твердость наплавленного металла HRC40-50 после закалки.

Таблица 10.1

Химический состав, % твердость наплавок и область применения некоторых марок проволоки для наплавки

Марка проволоки	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	V	Mo	S	P	Твердость наплавленного металла	Область применения
Углеродистые	Нп-25	0,22–0,3	0,17–0,37	$\leq 0,25$	$\leq 0,3$	–	–	–	0,04	0,04	160–220 HB	Наплавка валов
	Нп-45	0,42–0,5	–	–	–	–	–	–	–	–	170–230 HB	
	Нп-80	0,75–0,8	–	–	–	–	–	–	–	–	200–340 HB	
Легированные	Нп-40Х2Г2М	0,35–0,43	1,8–2,3	0,4–0,7	1,3–2,3	–	–	0,8–1,2	0,07	0,03	54–56 HRC	После закалки: коленчатые валы, детали с динамическим нагружением
	Нп-50ХФА	0,4–0,54	0,5–0,8	0,17–0,37	$\leq 0,4$	–	0,1–0,2	–	–	–	43–56 HRC	
	Нп-50ХФМС	0,45–0,55	0,3–0,6	0,8–1,2	5,3–6,5	$\leq 0,35$	–	1,2–1,6	0,04	0,04	42–48 HRC	

Марка проволоки	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	V	Mo	S не более	P	Твердость наплавленного металла	Область применения
Высоколегированные	0,16–0,25	≤ 0,8	≤ 0,8	13–15	≤ 0,6	–	–	–	0,03	0,03	38–45 HRC	Шейки колесчатых валов, штампы
	0,25–0,35	10–12	≤ 0,35	10–12	≤ 0,6	–	–	0,15–0,3Ti	–	–	200–220 HB	Гребные валы, лопасти гидротурбин
	0,5–0,65	1,3–1,8	0,4–0,7	2,6–3,6	≤ 0,35	9–10,5	0,3–0,5	–	0,04	0,04	42–50 HRC	Штампы горячей штамповки
Нп-Х20Н80Т	≤ 0,12	≤ 0,7	≤ 0	19–23	Основа	–	–	0,15–0,4Ti	0,015	0,02	180–230 HB	Выхлопные клапаны автотракторных двигателей, детали, работающие при повышенных температурах

При плазменной наплавке появляется возможность достаточно широко регулировать химический состав наплавленного металла путем применения специальных плазмотронов; здесь наплавка производится мелким металлическим порошком нужного состава, вдуваемого в плазму. Обычно доля участия основного металла в металле наплавки в этом случае минимальна.

При применении любых способов дуговой наплавки, особенно проволоками круглого сечения, для получения нужного состава наплавленного металла долю участия основного металла γ_0 в металле наплавки следует ограничивать. Это можно сделать, задавая необходимое перекрытие валиков при однодуговой наплавке, что особенно важно при первом слое многослойной наплавки. При ручной наплавке отношение $\frac{m}{b} \approx 0,35$, а при автоматической наплавке под флюсом $\frac{m}{b} \approx 0,4 - 0,5$. При ленточной наплавке отношение $\frac{m}{b}$ заметно уменьшается (рис. 10.2).

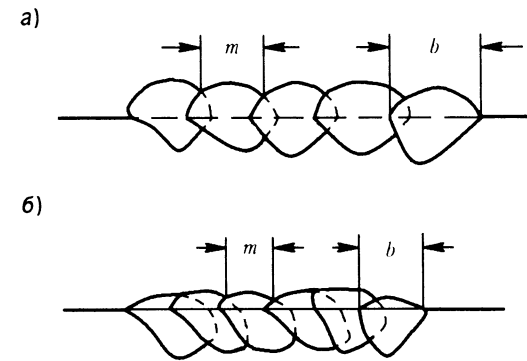


Рис. 10.2. Влияние шага наплавки на долю основного металла в составе наплавленного слоя:

a – шаг m близок к ширине валика ($\gamma_0 = 0,65$); б – шаг $m = 0,46b$ ($\gamma_0 = 0,45$)

Для наплавки в каждом конкретном случае рекомендуется отработать оптимальные режимы, особенно тогда, когда после наплавки необходима механическая обработка поверхности. Здесь следует стремиться к выбору жестких режимов, которые обеспечивают хорошее формирование с припуском на механическую обработку 1,5... 2,0 м. Особенно важна оптимизация режимов при наплавке тел вращения малого диаметра. Для избежания «ухода» ванны режимы должны быть ограничены по току, а электрод смещен с зенита навстречу вращению.

При наплавке больших по размеру плоских поверхностей целесообразно применять многоэлектродные автоматы или ленточные электроды. При плазменной наплавке часто применяют тонкую токоведущую проволоку в качестве присадки, что обеспечивает минимальное проплавление. Это особенно ценно при наплавке меди и ее сплавов, а также аустенитных сталей на низкоуглеродистые и низколегированные стали.

В качестве примеров применения плазменных способов наплавки можно привести восстановление изношенных канавок под компрессионные кольца поршней из алюминиевых сплавов судовых дизелей с применением композиционных проволок. Интересен процесс плазменной наплавки восстановления посадочных поверхностей втулок цилиндров дизелей применением бронз Бр.АМц9-2 и Бр.АМц3-1.

Следует отметить, что для всех часто применяемых в промышленности способов наплавки (а их практически столько, сколько и способов сварки) для конкретных составов наплавочных материалов, материала и конфигурации наплавляемой детали следует выбирать оптимальные режимы наплавки при принятом способе.

Существуют менее распространенные способы наплавки. Находит применение способ вибродуговой наплавки, при котором механически подающийся тонкий электрод (проволока диаметром 1,5...2,0 мм) специальным устройством подвергается вибрации с частотой 30...100 1/с с амплитудой 0,5...1,0 мм. Режим подбирается так, чтобы наплавка происходила с периодическими короткими замыканиями. Наплавка производится в среде охлаждаемой жидкости, что уменьшает деформации и увеличивает твердость наплавленного слоя. Способ хорош для наплавки цилиндрических изделий малого диаметра. Существуют способы наплавки в вакууме тонким электродом, они часто применяются, например, при наплавке тарелок клапанов двигателей внутреннего сгорания.

Иногда находят применение способы наплавки лежачим электродом. Процесс наплавки здесь осуществляется перемещением дуги, расплавляющей металл электрода, и оплавлением пластины (детали). Довольно часто применяется электродуговая наплавка меди, бронзы, латуни на поверхность стальных деталей. Затруднения, возникающие при такой наплавке, связаны с высоким средством меди к кислороду, низкой температурой плавления меди, значительным поглощением газов медью и различными величинами коэффициентов теплопроводности и линейного расширения.

Одним из неприятных моментов, возникающим при наплавке меди и ее сплавов на сталь, является образование в стали, под слоем меди, трещин, которые заполняются расплавом меди (или ее сплавов).

Объясняют появление этого дефекта расклинивающим действием жидкой меди, проникающей в микронадрывы по границам зерен стальной детали при одновременном действии термических напряжений растяжения.

При наплавке меди на низкоуглеродистые и низколегированные стали размер этих трещин и их количество невелики; однако при наплавке на аустенитные стали их число и размеры возрастают. Для уменьшения опасности возникновения в стали таких трещин рекомендуется вести наплавку на минимальной погонной энергии. Для оптимизации условий наплавки меди на сталь необходимо, чтобы поверхность стальной детали не расплавлялась. Она должна хорошо смачиваться (температура ее нагрева не должна превышать 1100 °С), а длительность контакта расплавленной меди со сталью при этой температуре должна быть не более 0,01...0,015 с, что приводит к резкому уменьшению содержания железа в диффузионной прослойке. Для наплавки меди на сталь применяют дугу, горящую в аргоне, а также сварку под плавными и керамическими флюсами. Эффективным способом наплавки бронзы является наплавка под активными керамическими флюсами.

10.2. ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ НАПЛАВКА

В целом ряде случаев, особенно при необходимости получения наплавленных слоев большой толщины, применяется электрошлаковая наплавка. Ее можно выполнять электродной проволокой, плавящимся мундштуком и электродами большого сечения. Иногда в качестве дополнительного присадочного материала используют металлические порошки, с помощью которых в наплавленный металл вводят необходимые легирующие элементы. Известны два основных способа электрошлаковой наплавки: в нижнем и вертикальном положениях.

В вертикальном положении можно наплавлять слой металла толщиной 20...90 мм. Скорость электрошлаковой наплавки на 20...30% больше скорости электрошлаковой сварки металла равной толщины. Если пользоваться формирующим устройством, то поверхность наплавленного слоя сохранит эту форму, что существенно сократит последующую механическую обработку наплавленной заготовки.

Схема электрошлаковой наплавки в нижнем положении показана на рис. 10.3. По слою легирующей шихты, покрытой флюсом, перемещают многоэлектродный наплавочный аппарат. Плавление происходит с трех сторон специальным водоохлаждаемым

ползуном. В него подают электродные проволоки. Глубина проплавления основного металла при оптимальных режимах составляет 1,5...2,0 мм, что при наплавке многих металлических (стальных) материалов считается допустимым.

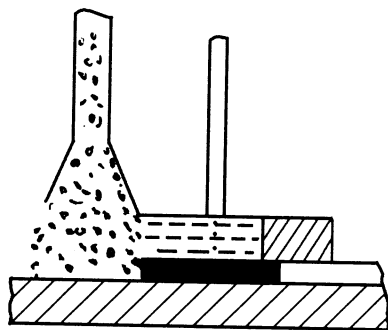


Рис. 10.3. Схема горизонтальной шлаковой наплавки

Применяя способ вертикальной наплавки, наплавляют поверхность прокатных валков; по этой технологии можно наплавлять на их поверхность слой чугуна. Прочность сцепления чугуна со сталью получается выше собственной прочности чугуна. Производительность электрошлаковой наплавки (например, валов диаметром 350 мм) в 15–20 раз выше, чем при одноэлектродной наплавке под флюсом, а стойкость биметаллических наплавленных валов в 2–3 раза выше, чем литых.

Электрошлаковая наплавка меди на сталь позволяет предотвратить оплавление основного материала детали (разработка ИЭС им. Е. О. Патона). В этом процессе используются флюсы с температурой плавления ниже температуры плавления меди, температура шлаковой ванны находится в интервале плавления присадочного металла (при этом она стабилизируется специальными устройствами), а сам шлак имеет высокую химическую активность по отношению к окислам присадочного и основного металла, восстанавливая или окисляя их.

Для сварки меди разработаны специальные флюсы, которые удовлетворяют указанным условиям (АН-10М, АН-12М). Они дают достаточно хорошую электропроводность шлака, который хорошо смачивает наплавленную поверхность. Чтобы избежать глубокого проникновения меди в сталь, наплавку ведут с минимальным нагревом наплавляемой поверхности и с максимально допустимой скоростью. Толщину наплавленного слоя при горизонтальной наплавке регулируют количеством подаваемого (или предварительно укладываемого) присадочного материала или

скоростью подачи присадочного металла и скоростью перемещения формирующего устройства.

В рассматриваемой схеме наплавки (рис. 10.4) используется неплавящийся электрод (например, пластина из графита).

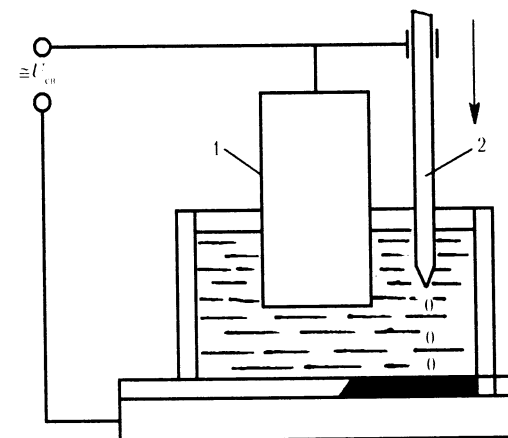


Рис. 10.4. Схема горизонтальной шлаковой наплавки меди на металл с использованием графитового электрода:

- 1 — неплавящийся (графитовый) электрод;
- 2 — плавящаяся присадочная проволока

С его помощью разогревают наплавляемую поверхность до заданной температуры. Плавление присадочного материала осуществляется либо за счет теплоты, выделяемой в шлаковой ванне при прохождении электрического тока между неплавящимся электродом и наплавляемой поверхностью, либо в результате использования присадочного металла в виде второго плавящегося электрода (возможно и совмещение этих вариантов, как это показано на схеме (см. рис. 10.4)). При наплавке желательно выполнять колебательные движения изделия или электродов при наведении шлаковой ванны. Поверхность наплавленного слоя обычно достаточно гладкая и не требует последующей механической обработки.

11. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ЧУГУНА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ РЕМОНТЕ

11.1. ОСОБЕННОСТИ СВАРИВАЕМОСТИ ЧУГУНА

Чугун представляет собой сплав железа с углеродом, содержание которого в сплаве превышает 2,14%. Обычно в чугунах присутствует некоторое количество кремния и марганца, серы и фосфора; иногда вводятся другие легирующие элементы для придания чугуна определенным свойствам.

Чугуны относятся к сплавам трудносвариваемым, что объясняется их химическим составом (высоким углеродом) и конечными свойствами. В зависимости от содержания в чугуне углерода в свободной форме (в виде графита) различают два вида чугуна, резко отличающихся по характеру излома.

Белый чугун характеризуется в изломе матово-белым цветом. В его структуру при комнатной температуре входят цементит и перлит. Весь углерод в нем находится в связанном состоянии в виде цементита; свободный графит в таком чугуне отсутствует, поэтому последний обладает высокой твердостью и хрупкостью.

Серый чугун имеет в изломе серый цвет и характеризуется наличием в структуре графита; при этом графит может находиться в разных формах (перлитный чугун, перлитно-ферритный и т. д.).

Серые перлитные нелегированные чугуны с пластинчатым графитом относятся к наиболее распространенному в машиностроении классу литейных чугунов. В зависимости от количества углерода, находящегося в виде графита и цементита, различают следующие его типы.

Серый перлитный чугун отличается тем, что в нем около 0,8% углерода находится в виде цементита, входящего в состав перлита, а остальная часть углерода (1,5...3,0%) находится в виде графита. Таким образом, металлическая основа этого чугуна представляет собой перлитную сталь, прорезанную прожилками графита; феррит в виде отдельных зерен в этом чугуне не содержится.

Серый перлитно-ферритный чугун содержит углерод в виде графита, т. е. характеризуется графитизацией части цементита, входящего в состав перлита. Его металлическая основа состоит из перлита, зерен феррита и прожилок графита.

Серый ферритный чугун почти весь углерод содержит в виде графита. Его структура состоит из зерен феррита, пререзанных прожилками графита.

Графит, обладая большой хрупкостью, ослабляет металлическую основу чугуна, однако он одновременно придает ему ряд ценных в технологическом отношении свойств (облегчает обрабатываемость резанием и т. д.).

Механические характеристики чугуна во многом зависят от количества содержания в нем графита и характера его распределения по структуре. Отбел при сварке чугуна – явление весьма нежелательное, так как образование структурно свободного цементита создает большую хрупкость металла в зоне перехода от шва к основному металлу. Отбеленный металл такого слоя имеет высокую твердость (500...600 НВ), что кроме возможности образования трещин создает затруднения при механической обработке деталей. Поэтому при назначении технологии сварки следует избегать местных перегревов металла, ибо это способствует увеличению толщины отбеленного слоя в переходной зоне.

Марки серых чугунов определяются его прочностными характеристиками (предел прочности на разрыв и предел прочности на изгиб) – СЧ12-28 и т. д. Серые чугуны разных модификаций в основном применяются для изготовления методом литья самых разнообразных деталей. К основным трудностям сварки серого чугуна относятся следующие.

1. Достаточно резкие скорости охлаждения металла ЗТВ и металла шва, сопутствующие термическому циклу сварки, способствуют отбеливанию чугуна, что связано с появлением выделений цементита в различной форме и охрупчиванию этих участков.

Основными легирующими элементами чугунов являются углерод и кремний. Они во многом определяют конечную структуру, а значит, и свойства чугунов. При конкретном содержании углерода (рис. 11.1) увеличение содержания кремния при прочих равных условиях способствует графитизации чугуна и уменьшению количества цементита в базовой структуре ($\Phi \rightarrow \Pi$).

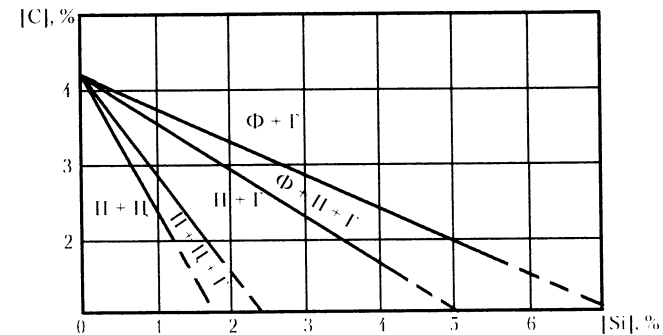


Рис. 11.1. Совместное влияние углерода и кремния на структуру чугуна:

Π – перлит; Φ – феррит; Ц – цементит; Γ – графит

Состав электродных стержней для горячей сварки чугуна, % масс.

Марка	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Примечание
А	3,0–3,5	3,0–3,4	0,5–0,8	0,2–0,4	До 0,08	До 0,05	До 0,3	Для горячей сварки
Б	–”–	3,5–4,0	–”–	0,3–0,5	–”–	–”–	–”–	Для полугорячей и горячей сварки

- Наличие остаточных сварочных напряжений при малой пластичности отбеленных участков металла приводит к образованию трещин в металле шва и ЗТВ.
- При сварке чугуна идет интенсивное кипение ванны с высоким газовыделением, что при кристаллизации шва может привести к образованию пор.
- Чугун весьма жидкотекуч при расплавлении, что часто требует применения специальных мер для формирования шва.
- При сварке ряда марок чугунов, имеющих кремний (или подобные элементы), на поверхности сварочной ванны образуются окисные тугоплавкие пленки, что приводит к образованию непроваров и несплавлений.

11.2. СПОСОБЫ СВАРКИ ЧУГУНА

Существуют два способа сварки чугуна, широко применяемых в промышленности.

- Горячая сварка.** При этом способе изделие, подлежащее сварке, нагревают до температуры 600...650 °С с медленным последующим охлаждением после выполнения всех сварочных работ. Такой режим не приводит к образованию отбеленных и закаленных участков в ЗТВ и металле шва.

Для каждой марки серого чугуна следует выбирать такие скорости охлаждения, которые приводят к обеспечению сохранения в этих зонах структуры серого чугуна.

Способы нагрева могут быть весьма различны и зависят в основном от габаритов свариваемых изделий. Это могут быть муфельные печи, горны и т. д. В качестве электродов применяют чугунные прутки с нанесенным на них покрытием. Состав чугунных стержней приведен в табл. 11.1. Диаметр прутков 5,0...20,0 мм. В состав покрытия входят стабилизирующие и легирующие компоненты. К последним относятся графит, корбарунд, ферросилиций, силикокальций, силикомагний. Наиболее применяемые электроды марок ОМЧ-1, ВЧ-3, ЭП4. Диаметр электрода выбирается в зависимости от толщины свариваемого элемента, сила тока – от диаметра электрода: $I_{св} = (60...100)d$. Возможно применение угольного электрода: сварка производится на постоянном токе прямой полярности. В качестве присадки можно применять прутки марок А и Б, в качестве флюса – безводную (прокаленную) буру.

Последнее время применяют механизированную сварку порошковой проволокой марки ППЧ-3, что позволяет повысить производительность процесса сварки за счет его механизации и облегчить труд сварщика.

Горячая сварка – тяжелый производственный процесс, однако он позволяет получать сварные соединения со свойствами, практически равноценными свойствам основного металла для многих марок чугунов.

- Холодная сварка.** Основная трудность, возникающая при холодной сварке чугунными электродами, заключается в образовании структур белого чугуна в шве и околошовной зоне и резкой закалке участков металла, нагретых при сварке выше температур точки A_1 , что, в конечном итоге, ведет к образованию трещин. При этом на их образование влияют следующие свойства серого чугуна:
 - он обладает очень низкими пластичностью и деформационной способностью;
 - при всех температурах его прочность значительно ниже прочности углеродистых сталей;
 - быстрое охлаждение тонких элементов детали при литье ведет к их отбеливанию.

С учетом этого выбор сварочных материалов для холодной сварки должен обеспечить такой состав металла шва, при котором его пластичность должна быть гораздо выше пластичности самого чугуна.

Во избежание образования холодных трещин можно идти разными путями.

Одним из них является получение металла шва со структурой серого чугуна с благоприятной формой графитовых включений, что достигается введением в наплавленный металл достаточно большого количества графитизаторов и легированием элементами, способствующими получению сферических карбидов (например, магнием).

Для этого применяются, например, электроды ЭМЧ. Их стержень изготовлен из чугуна с высоким содержанием кремния (до 5,2%), а покрытие имеет два слоя. Первый слой содержит легирующие компоненты (графит, силикомагний, алюминий, железный порошок), а второй – компоненты, обеспечивающие шлаковую и газовую защиту (мрамор, плавиковый шпат). Этими электродами удается без подогрева сваривать детали с толщиной стенки до 12,0 мм и получать при этом швы без отбеливания. Повышение свариваемой толщины приводит к увеличению скоростей охлаждения и требует предварительного подогрева до температур 400 °С.

Иногда в качестве электродного прутка применяют никелевые чугуны, так как они обеспечивают получение металла шва с хорошей обрабатываемостью. При этом следует помнить, что металл шва, выполненный такими электродами, обладает повышенной склонностью к образованию горячих трещин.

Серый чугун в шве можно получить, применяя в качестве прутков обычную малоуглеродистую проволоку (Св-08А), вводя при этом в шов через покрытие достаточное количество графитизаторов. Примером являются электроды марки ЭМЧС, которые имеют трехслойное покрытие. Первый слой содержит компоненты графитизаторы, второй – защитные компоненты (создающие газовую и шлаковую защиту), третий слой состоит из 100% графита. Такими электродами можно сваривать изделия с толщиной стенок до 10,0 мм: большая толщина требует подогрева.

Для механизированной холодной сварки можно применять порошковые проволоки (до толщин 10,0 мм без подогрева марки ППЧ-1; при большей толщине – проволоку марки ППЧ-2 с подогревом изделия). Структура швов при сварке этими проволоками близка к структуре серого чугуна за счет высокого содержания в ее составе кремния.

Вторым путем при холодной сварке является получение в металле шва низкоуглеродистой стали. При сварке чугуна низкоуглеродистыми электродами наибольшую опасность представляют первые проходы, так как даже небольшая доля участия основного металла в металле шва приводит к получению в металле слоя высоколегированной стали (по мере увеличения количества слоев легированность их, естественно, уменьшается). Поэтому наибольшую опасность, с точки зрения отслоения металла и появления в нем трещин, представляет первый слой (точнее, зона линии сплавления). Для уменьшения опасности перегрева основного металла применяют сварку электродами малых диаметров на минимально допустимых токах. Однако все эти приемы не гарантируют отсутствия дефектов, поэтому этот способ служит в основном для декоративной заделки дефектов литья.

Для увеличения прочности сварного соединения при ремонте конструкций из чугуна применяют метод постановки и обварки стальных шпилек. Дефект (например, трещина) надлежащим образом разделяется, по разделке делается высверловка с нарезкой резьбы и последующей постановкой стальных шпилек так, чтобы выступающая часть составляла 0,45...1,2 диаметра шпильки (диаметр шпильки зависит от ремонтируемой толщины и составляет $(0,3...0,4)s_{\text{с}}$, но не более 12,0 мм).

Шпильки обычно располагают в шахматном порядке, на кромках разделки трещины, расстояние между ними должно быть достаточным для свободного манипулирования дугой. Затем, применяя электрод диаметром не более 3,0 мм, на минимально возможных токах сначала обваривают шпильки, а затем заполняют промежутки между ними. Иногда при этом способе применяют специальные флюсы (состоящие, например, из 50% буры, 20% каустической соды и 30% железной окалины), что приводит к энергичному окислению углерода и, как результат, к увеличению деформационной способности металла шва. Здесь положительные результаты можно получить при относительно небольших свариваемых толщинах, ибо при их увеличении необходимо увеличивать тепловую мощность дуги, что приводит к отбеливанию металла в ЗТВ и образованию в ней трещин.

Можно поступать и по-иному. Если в металл шва ввести ванадий, который является энергичным карбидообразователем, то в нем образуются карбиды ванадия, которые не растворяются в железе и имеют относительно невысокую твердость, что способствует при их мелкодисперсном распределении повышению пластичности металла. Такие электроды имеют марку ЦЧ-4 (стержень из проволоки марки Св-08А); содержат в покрытии 66% феррованадия. Этими электродами производят облицовку (выполняют первый слой на малых токах короткими швами), а затем разделку заполняют электродами УОНИ 13/45. Способ вполне применим для заварки дефектов литья, проведения ремонтных работ на изделиях из серого и высокопрочного чугуна. Он обеспечивает достаточно хорошую прочность и обрабатываемость металла шва.

Довольно широкое распространение приобрел способ холодной сварки чугуна, обеспечивающий получение в металле шва цветных или специальных сплавов. Его суть заключается в создании сварных швов из сплавов на основе меди или никеля.

И медь, и никель способствуют уменьшению растворимости углерода в железе и его графитизации; при этом ни тот, ни другой металл соединений с углеродом не образуют. В зоне неполного растворения (у линии сплавления) они уменьшают возможность отбеливания. Металл шва при этом обладает высокой пластичностью, что способствует

релаксации остаточных сварочных напряжений и уменьшает возможность образования трещин.

Проще всего осуществить этот способ, применяя пучок электродов. Стальной электрод может быть любой марки (лучше УОНИ 13/45 или УОНИ 13/55). Диаметр медного прутка должен быть больше диаметра стального электрода примерно на 25%. В качестве 3-го прутка рекомендуется латунный пруток диаметром 1,5...3,0 мм. Медные прутки можно покрывать обычной меловой обмазкой толщиной 0,2...0,3 мм на сторону.

Опыт применения комбинированного пучка электродов показал, что их легко и просто изготавливать на заводе, где необходимо производить сварку той или иной конструкции из чугуна. Следует лишь соблюдать ряд требований:

- комбинированные пучки необходимо составлять из стальных и медных прутков небольшого сечения (диаметром 1,6...4,0 мм для сварки в нижнем положении и не более 3,0 мм для сварки в вертикальном положении);
- на медные прутки лучше наносить качественное покрытие газослакообразующего типа;
- электроды из трех составляющих следует собирать не в ряд, а компактно (треугольником).

Сварочный ток выбирается в зависимости от общего сечения стержней в пучке. Так, при диаметре стального электрода 3,0 мм и двух медных электродах диаметром по 3,0 мм $I_{св} = 140...160$ А (для работы на деталях толщиной не более 12,0 мм). При диаметре стального электрода 4,0 мм и двух медных по 4,0 мм $I_{св} = 170...190$ А (для работ на деталях с толщиной более 12,0 мм).

При ремонте деталей, долгое время бывших в эксплуатации, сваркой пучком электродов рекомендуется применять флюс, целиком состоящий из плавленной буры.

Сварку пучком электродов следует вести поперечными, равномерными, дугообразными движениями с наклоном электрода в сторону сварки на угол 35...45°, что необходимо для хорошего перемешивания ванны. Пучок ведется таким образом, чтобы медный пруток был впереди стального для лучшего омеднения поверхности. Провар должен быть минимальным, дуга во избежание сильного окисления металла должна быть предельно короткой, сварку лучше проводить «на себя», ибо этот способ позволяет хорошо наблюдать за тем, как идет облуживание поверхности медью.

Применяется и другой тип электродов, когда медный стержень оплетается жестью толщиной 0,25...0,3 мм, которая в виде ленты по

спирали навита на него. После этого на электрод наносят покрытие. Могут быть и другие конструкции электродов, но во всех случаях содержание железа в наплавленном металле не должно превышать 10...15% во избежание образования большого количества очень твердых включений железа, что ухудшает пластичность металла шва.

Существуют также медно-железные электроды, когда на медный стержень наносится основное покрытие, состоящее на 50% из железного порошка и на 50% из покрытия УОНИ 13 (электроды марки ОЗЧ-1). Металл шва, выполненный такими электродами, достаточно пластичен, что позволяет в горячем состоянии проводить его проковку с целью разрядки остаточных сварочных напряжений и предотвращения образования трещин в металле ЗТВ.

При сварке электродами этих групп не следует допускать высокого разогрева детали, для этого ведут сварку короткими участками с перерывами на охлаждения на минимальных токах, при которых возможно стабильное горение дуги (длина участка 30...80 мм с послойным охлаждением).

Все медно-железные электроды дают достаточно неоднородную структуру шва: в мягкой медной матрице расположены твердые включения железа, что затрудняет последующую обработку швов. Несколько облегчает дело замена стального низкоуглеродистого прутка на аустенитный. Все разновидности медно-железных электродов можно с успехом применять при ремонте литья ответственного назначения.

Если в системе медь-железо заменить последнее на никель, то можно получать швы без твердых железисто-углеродистых включений, так как никель и медь не растворяют углерод. В качестве прутков для таких электродов используют монель-металл (например, НМЖМц28-2,5-1,5), константан (НМЦ40-1,5) или нихром (Х20Н80). Ограничивает применение таких электродов дефицит никеля и высокая склонность металла шва к образованию горячих трещин. Поэтому электроды не рекомендуется применять в случае больших объемов наплавки, где трудно избежать образования горячих трещин и понижения прочности.

Рассматривая достоинства и недостатки горячей и холодной сварки чугуна, следует отметить следующее.

При горячей сварке чугуна, как правило, в наплавленном металле получается чугун с заданными свойствами.

Все применяемые здесь способы сварки проводятся с предварительным подогревом, температура которого (150...650 °С) связана с маркой

чугуна, габаритами изделий и спецификой способа. К таким способам относится и газовая сварка, применяемая для исправления таких дефектов литья как трещины, раковины малых и средних размеров на обрабатываемых и обработанных поверхностях. Сварка ведется с применением чугунных присадочных прутков ПЧ-1, ПЧ-2 и т. д. и флюса (бура).

Ручная электродуговая сварка электродами на основе чугуна со специальным покрытием применяется для исправления крупных дефектов литья.

Механизированная электродуговая сварка порошковыми проволоками ПП-АН41, ПП-43м, ПП-В45 и др. также рациональна для исправления крупных дефектов.

Все эти способы обеспечивают одинаковость структуры основного и наплавленного металла, хорошие свойства наплавленного металла, в том числе и его последующую обрабатываемость механическими способами.

Все способы холодной сварки, проводимой без подогрева, дают наплавленный металл не чугуна состава, который обладает удовлетворительной обрабатываемостью резанием. Здесь применяются различного рода сварочные материалы. Для исправления несквозных дефектов малых и средних размеров на обрабатываемых и обработанных поверхностях могут применяться электроды из медно-никелевой проволоки со специальным покрытием типа МНЧ-2 или электроды из железоникелевой проволоки типа ОЗЖН-1. Для исправления небольших дефектов в ответственных изделиях хорошо себя зарекомендовали электроды из никелевой проволоки типа ОЗЧ-3 или ОЗЧ-4.

Область применения стальных электродов и проволок ограничивается заваркой несквозных дефектов на необрабатываемых поверхностях чугунных отливок; при этом часто в наплавленном металле и металле околшовной зоны образуется сетка мелких трещин. И здесь какие-либо приемы бессильны для их полного предотвращения. Поэтому для заварки ответственного литья стальные электроды в большинстве случаев рекомендованы быть не могут.

При большом объеме холодной сварки для заварки дефектов литья желательна ее механизация. Для этого можно применять самозащитные проволоки сплошного сечения на основе никеля (ПАНЧ-11) и медно-никелевого сплава (МН-25). Применяя тонкую проволоку, следует использовать узкую разделку для уменьшения объема наплавленного металла.

11.3. ТЕХНОЛОГИЯ ЗАВАРКИ ДЕФЕКТОВ ЛИТЬЯ ГОРЯЧИМ СПОСОБОМ

Перед заваркой дефект должен быть четко определен и удален. При наличии трещины прежде всего следует установить ее размер и сделать засверловку по ее концам. После этого район заварки должен быть разделан под сварку таким образом, чтобы была возможность доступа по всей площади заварки. Подготовленная под заварку выборка не должна иметь выступов и острых углов. Мелкие раковины для того, чтобы избежать отбела, рекомендуется искусственно увеличивать по глубине до 5,0...6,0 мм и до 30,0 мм и более по ширине. В зависимости от места расположения дефекта на отливке для предотвращения вытекания жидкого металла следует производить подформовку металла заварки.

Формовку выполняют с помощью графитовых пластинок, скрепленных формовочной массой, которая состоит из кварцевого песка, замешанного на жидком стекле (могут использоваться и другие формовочные материалы, применяемые в литейном производстве).

Подогрев может осуществляться как общий (в печах), так и местный (различными переносными источниками тепла). Для чугуна марок СЧ15-32 и СЧ18-36 температура нагрева 700...800 °С при регулировании скорости нагрева и охлаждения отливок не более 150 °С/ч. Заварка производится электродами ОМЧ-1 (либо им подобными), режим по току выбирается в соответствии с принятым диаметром электрода, весь объем по заварке одного дефекта должен выполняться без перерывов за один прием. Сначала расплавляется донная часть дефекта, затем образовавшийся объем жидкого металла металлическим крючком «выплескивается» для удаления неметаллических включений. Для хорошего проплавления конец электрода большую часть времени должен находиться у стенок разделанного дефекта. По окончании сварки производят подогрев для выравнивания температур основного и наплавленного металла с последующим медленным охлаждением.

12. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРКИ

Управление качеством сварки должно предусматривать контроль всех факторов, от которых зависит качество сварной конструкции. Высокое качество сварных соединений в первую очередь зависит от уровня и состояния технологического процесса изготавливаемой конструкции. Поэтому обнаружение дефектов должно служить сигналом не столько к отбраковке дефектной продукции, сколько к оперативному вмешательству в технологический процесс изготовления с целью его корректировки.

Такая обратная связь обеспечивает предупреждение дефектов и отбраковки продукции. В оптимальной схеме контроля должны быть отражены следующие его этапы:

- 1) контроль технической документации на стадии проектирования (выбор конструкции и технологии сборки и сварки, выбор основного металла, обоснование норм допустимых дефектов и план контроля; выбор методов контроля и т. д.);
- 2) контроль технологической подготовки производства (проверка условий и качества заготовки, сборки; проверка подготовки и хранения сварочных материалов; проверка сертификации и подготовка сварщиков, контролеров);
- 3) поэтапный контроль технологических операций, включая контроль готовой продукции, с рациональным использованием принятых методов и средств контроля;
- 4) проверки качества контрольных операций (проверка соблюдения и чувствительности методов дефектоскопии, контроль дефектоскопических материалов, квалификации операторов и т. д.).

В сварочном производстве принято разделять дефекты подготовки и сборки изделий под сварку и сварочные дефекты.

Наиболее характерными дефектами первого вида при сварке плавлением являются: неверный угол скоса кромок на кромках с различными видами разделки; слишком большое (или слишком малое) притупление по длине стыкуемых кромок; непостоянство зазора между кромками по длине соединения; несовпадение стыкуемых плоскостей кромок: расслоение металла и загрязнения на кромках.

Подобные дефекты могут появляться из-за неисправности заготовительного оборудования, приспособлений для сборки, недоброкачества используемых материалов, ошибки в чертежах, низкой квалификации рабочих и т. д.

Правильность сборки контролируют внешним осмотром и промером при помощи шаблонов и других инструментов.

12.1. ДЕФЕКТЫ СВАРНЫХ ШВОВ И СОЕДИНЕНИЙ

Все дефекты сварных швов подразделяются на внешние и внутренние.

Внешние дефекты

Нарушение заданной формы и размеров шва. Дефект выявляется при визуальном осмотре и контроле усиления шва специальными шаблонами. Причины появления этого рода дефектов разнообразны. При ручной сварке они могут появляться из-за низкой квалификации сварщика (неудовлетворительное формирование). При механизированных способах сварки дефекты могут объясняться неравномерным зазором по длине стыка (это связано с прожогами при увеличении зазора и возможным непроваром при его отсутствии). Нарушение установленных технологическим процессом режимов также ведет к нарушению формирования. При сварке тавровых соединений наиболее частым нарушением является завышенный калибр шва. Это ведет к неоправданному расходу сварочных материалов, увеличению массы сварной конструкции, увеличивает остаточные деформации.

Для контроля сборочных зазоров применяют клиновидные щупы, а для контроля формы усиления и зазора — различной конструкции шаблоны, наибольшее распространение из которых получили универсальные (рис. 12.1).

Прожоги особенно характерны для механизированных способов сварки. Причины их появления — местное изменение (увеличение) зазора по длине соединения при сварке «на весу» (без всякого рода подкладок с тыльной стороны соединения); сварка на повышенных режимах; неравномерность формирования шва (рис. 12.2, а); наружные непровары (рис. 12.2, б). Эти дефекты объясняются в основном колебаниями параметров режима при механизированной сварке.

Подрезы (резкие углубления в месте перехода усиления шва к основному металлу) ослабляют сечение сварного соединения и, что особенно важно, являются концентраторами напряжений и могут быть причиной начала разрушения при эксплуатации конструкции (рис. 12.2, в). Причинами их появления являются нарушение техники сварки (при ручной сварке) и неверно выбранные режимы (при сварке механизированной). После соответствующей зачистки подрезы подлежат подварке.

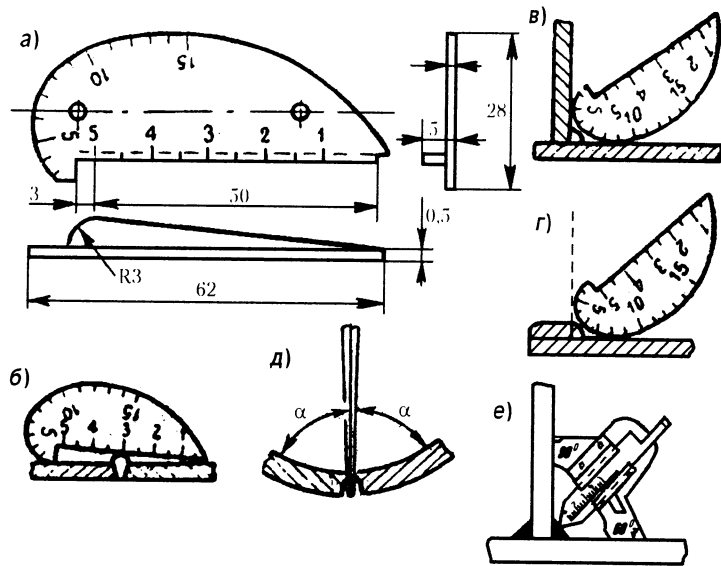


Рис. 12.1. Шаблоны для контроля сборочных и сварочных операций (параметры сварных швов):

a – общий вид универсального шаблона; *b* – контроль калибра углового шва; *в* – контроль калибра нахлесточного шва; *г* – контроль высоты усиления стыкового шва; *д* – контроль сборочного зазора; *е* – шаблон для контроля калибра углового шва

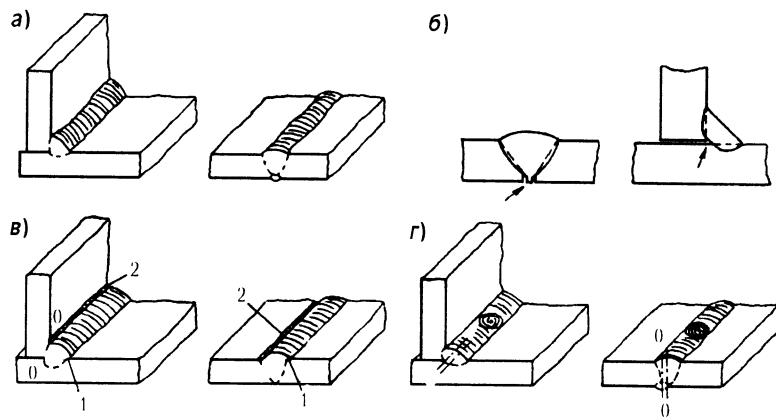


Рис. 12.2. Некоторые виды наружных дефектов сварных соединений:
a – неравномерность размеров в разных сечениях по длине; *б* – наплывы 1 и подрезы 2; *г* – кратеры

Кратеры (места окончания шва при резком обрыве дуги) недопустимы (рис. 12.2, *г*), так как ослабляют сечение шва и являются местом сосредоточения дефектов (трещин, зашлаковок). Если таковые имеют место, то они должны быть удалены зачисткой и аккуратно заплавлены.

Трещины, выходящие на поверхность металла шва или ЗТВ, определяются визуально, с помощью капиллярных или магнитных методов контроля. Причины их возникновения многообразны.

Внутренние дефекты

Непровары, кромочные несплавления. Они ослабляют сечение соединения и создают концентрацию напряжений в вершине непровара при нагрузке сварного соединения. Как правило, подлежат удалению путем вырубki с последующей заваркой. Причинами их возникновения являются неправильный выбор режимов сварки (мала сила тока) или нарушение техники сварки.

Несплавления (слипания) представляют собой несплошности мало раскрытия на свариваемых поверхностях, кромках металла или между металлом отдельных проходов при многослойной сварке. Дефект этот представляет серьезную опасность, особенно с учетом того, что он относительно плохо выявляется средствами дефектоскопии.

Внутренние трещины могут быть горячими и холодными. Определяются радиографическим или ультразвуковым методами контроля. В ответственных конструкциях недопустимы и подлежат удалению, которое производится по специально разработанной документации. Они также могут образовываться вследствие плохой зачистки кромок от окалины и ржавчины; часто – при недостаточной зачистке от шлака поверхности шва при многослойной сварке. При любой их величине на концах трещин велика местная концентрация напряжений; появляется опасность разрушения во время эксплуатации конструкции.

Микроскопические шлаковые включения в виде нитридов, сульфидов, фосфоритов, окиси железа, легкоплавких эвтектик снижают пластичность металла шва. Небольшие округлые включения (как и небольшое количество газовых пор) обычно не опасны и допускаются в количестве, определенном техническими условиями (правилами контроля) на изготовление конкретной конструкции.

Металлические включения характерны для швов, выполняемых аргодуговой сваркой вольфрамовым электродом и состоят из частичек вольфрама, попадающих в шов при контактном зажигании дуги.

Газовые включения (поры) и **шлаковые включения.** Первые появляются вследствие неполной дегазации сварочной ванны, вторые явля-

ются следствием металлургических процессов, происходящих между шлаком и металлом сварочной ванны.

12.2. ВНЕШНИЙ ОСМОТР И ИЗМЕРЕНИЯ ШВОВ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Этот вид контроля применяется практически для всех операций обработки, сборки и сварки конструкции. Контроль начинается с осмотра материалов (листов, профиля, проволоки, электродов), проверки качества сборки и качества готовых сварных конструкций.

Материал может браковаться при наличии вмятин, заусенцев, окислы, ржавчины (их допустимость или недопустимость регламентируется соответствующим стандартом или ТУ). Во многих случаях необходим входной контроль материалов, идущих на изготовление конструкций (химический анализ, определение механических свойств и т. д.)

Осмотром и замерами определяют качество подготовки кромок под сварку и сборку заготовок, чистоту кромок, соответствие зазоров технической документации (особо – качество сборки: соответствие подготовки кромок конструктивных элементов нормативной документации). Эти операции обеспечивают высокое качество изготавливаемых конструкций и должны неукоснительно выполняться.

Важным звеном в цепи контрольных операций является наблюдение за процессом сварки, что позволяет предотвратить появление дефектов. По приборам контролируют заданные параметры режимов сварки ($I_{св}$, U_d и $\tau_{св}$ при автоматической сварке), величину расхода защитного газа (по показаниям ротаметра), правильность раскладки проходов при многопроходной сварке.

Для контроля поверхностей швов часто пользуются лупой (возможное выявление поверхностных трещин), иногда применяются эталоны для контроля качества поверхности по цвету.

Большое внимание уделяется окончательному контролю. Здесь выявляются поверхностные трещины и раковины, подрезы, свищи, прожоги, натеки, непровары кромок. Допустимость тех или иных дефектов и порядок их удаления определяются соответствующими правилами контроля. Вид поверхности шва часто позволяет определить нестабильность режима (неравномерная чешуйчатость, разная ширина и высота шва указывают на колебания мощности дуги и т. д.).

12.3. МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ

К методам контроля внутренних дефектов относятся радиационный и ультразвуковой контроль.

Радиационный контроль

Под этим видом контроля понимают неразрушающий контроль, основанный на взаимодействии проникающего ионизирующего излучения с контролируемым объектом (рис. 12.3).

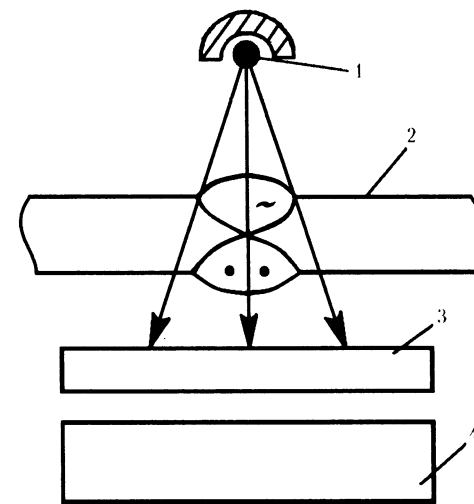


Рис. 12.3. Схема радиационного контроля:

1 – источник излучения; 2 – объект контроля; 3 – детектор излучения;
4 – средства расшифровки и оценки результатов контроля

При прохождении через вещество ионизирующего излучения происходит его ослабление – поглощение и рассеивание. Степень ослабления зависит от толщины s и плотности ρ контролируемого материала, а также от интенсивности M и энергии E самого излучения. Наличие в материале дефектов размером Δs приводит к резкому изменению энергии и интенсивности выходящего пучка излучения; выходящий пучок несет дефектоскопическую информацию о внутренней структуре контролируемого материала.

Источником излучения могут быть промышленные рентгеновские аппараты или гамма-дефектоскопы, заряженные радиоактивными изотопами.

Существуют три метода радиационного контроля – радиографический, радиоскопический и радиометрический.

Радиографический контроль основан на фиксации статического изображения внутреннего строения контролируемого объекта при просвечивании его ионизирующим излучением.

Радиоскопический метод основан на получении статического или динамического изображения на экране внутренней структуры контролируемого соединения при его просвечивании ионизирующим излучением.

Радиометрический метод контроля основан на получении информации о внутренней структуре контролируемого объекта, представленной в цифровой или аналоговой форме.

В промышленности широко распространен радиографический метод, при котором в качестве детектора используется радиографическая пленка. В зависимости от вида излучения различают рентгенографию и гаммаграфию. При рентгенографии применяют рентгеновское (так называемое тормозное) излучение, представляющее собой разновидность электромагнитных колебаний, которые по сравнению с видимым светом и ультрафиолетовым излучением имеют как общие волновые свойства, так и специфические особенности, связанные с их квантовыми свойствами (длина волны рентгеновского излучения $6 \cdot 10^{-9}$ м). Источником рентгеновского излучения является рентгеновская трубка, которая представляет собой стеклянный вакуумный баллон с двумя впаянными электродами. Рентгеновское излучение генерируется при торможении на аноде потока электронов, испускаемых катодом.

γ -излучение (длина волны $10^{-13} \dots 10^{-12}$ м) возникает в естественных или искусственных радиоизотопах при их распаде. γ -кванты обладают (в зависимости от их энергии) существенно большей проникающей способностью по сравнению с тормозным рентгеновским излучением.

Рентгенографию применяют преимущественно в цеховых условиях и реже в условиях монтажа, когда к контролю качества сварных соединений предъявляются высокие требования по чувствительности. Гаммаграфия доминирует при контроле сварных соединений, расположенных в труднодоступных местах конструкции, преимущественно в монтажных условиях.

Радиографические пленки используют в комбинации с усиливающими металлическими или флуоресцентными экранами. Применение таких экранов приводит к сокращению экспозиций, а их усиливающее действие основано на выбивании излучением из их поверхности электронов, которые эффективно взаимодействуют с радиографической пленкой. В качестве материалов для таких экранов используют фольгу из

тяжелых металлов (медь, свинец). Эти экраны устанавливают либо позади, либо впереди радиографической пленки.

Время экспозиции (просвечивания) зависит от чувствительности радиографической пленки, фокусного расстояния, мощности экспозиционной дозы, толщины просвечиваемого материала, его состава и определяется опытным путем. От выбора фокусного расстояния зависит производительность контроля и минимальные размеры выявляемого дефекта.

Чувствительность контроля определяют визуально как минимальную величину элемента эталона чувствительности, различимую на радиографическом снимке. Эталон чувствительности (рис. 12.4) устанавливают рядом с просвечиваемым швом.

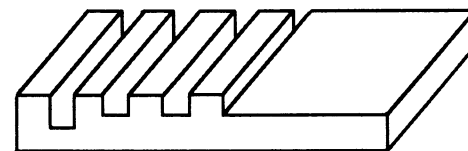


Рис. 12.4. Канавочный эталон чувствительности

Размеры дефектов, выявляемых при радиографическом контроле, зависят от его параметров (характеристик источника излучения, радиографической пленки) и условий проведения. При контроле рентгеновским излучением выявляемость локальных и протяженных дефектов и производительность контроля зависят от величины напряжения на трубе рентгеновского аппарата.

Радиографический контроль хорошо выявляет одиночные дефекты локальной формы (газовые, шлаковые и вольфрамовые включения), цепочки пор. Выявляемость внутренних трещин связана совпадением падающего луча излучения с плоскостью расположения трещины внутри металла.

Большое значение имеет правильно выбранная схема контроля сварного соединения, которая определяется его конструкцией.

Объем контроля в судостроении определяется правилами контроля (техническими условиями на изготовление) в зависимости от категории конструкции. Так, для сварных конструкций из сталей с пределом текучести до 500 МПа:

I категория – 20% протяженности шва;

II категория – 5% протяженности шва;

III категория – 2% протяженности шва.

После проявления пленки производится ее оценка по 3-балльной шкале. Критерии оценки балльности приведены в соответствующей технической документации (правилах контроля, правилах Регистра и т. д.). Они устанавливают допустимое наличие различного типа дефектов. Наименьшее количество дефектов допускается при оценке по баллу 3. Так, при сварке стыковых швов низколегированными материалами отдельные округлые газовые и шлаковые включения размером 1,0...2,0 мм (в зависимости от толщины) допускаются в количестве не более одного на 100 мм длины шва. Не допускаются цепочки включений округлой и продолговатой формы, непровары и трещины. Последние два вида дефектов не допускаются и при оценке снимков баллами 2 и 1. Выявленные недопустимые дефекты должны удаляться (газовой строжкой либо механическим путем) с последующей заваркой с контролем отремонтированных участков.

Ультразвуковой метод контроля сварных соединений

Метод этот основан на исследовании распространения упругих колебаний с частотой 0,5...25 МГц в контролируемых изделиях. Различают три основных метода по признаку обнаружения дефекта: теневой, зеркально-теневой и эхо-метод.

При теневом методе (рис. 12.5, а) дефект обнаруживают по уменьшению интенсивности (амплитуды) ультразвуковой волны, прошедшей через изделия от излучающего (И) искателя к приемному (П). Этот метод предполагает двухсторонний доступ к контролируемому изделию.

При зеркально-теневом методе (рис. 12.5, б) дефект обнаруживают по уменьшению интенсивности (амплитуды) отраженной от противоположной поверхности изделия ультразвуковой волны. Эту поверхность, зеркально отражающую волну, называют донной, а импульс, от нее отраженный, — донным импульсом.

При эхо-методе дефект обнаруживается эхо-импульсом, отраженным от него. При любом методе контроля возможно использование двух искателей, один из которых выполняет функции излучения, а другой приема. Такая схема включения искателей называется раздельной (рис. 12.5, в). В то же время при эхо-методе (как и при зеркально-теневом) возможно применение одного искателя (ИП), включенного по совмещенной схеме, при которой один и тот же искатель выполняет функции излучения зондирующих импульсов и приема эхо-сигналов (рис. 12.5, г).

Для возбуждения и регистрации ультразвуковых колебаний используют электроакустические преобразователи в виде пластин из пьезоакустических материалов: кварца, цирконата, титаната свинца, титаната бария и др. Толщину излучающей пластины подбирают в зависимости

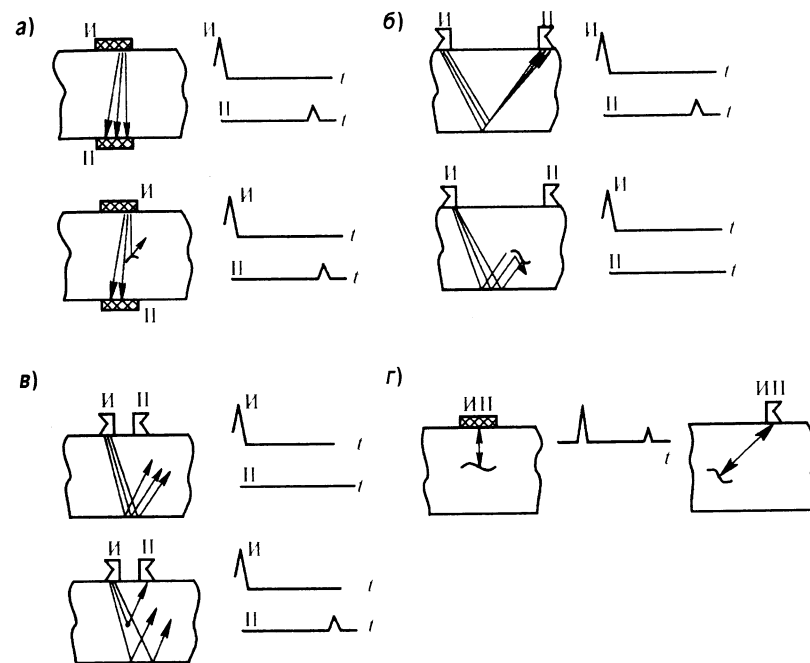


Рис. 12.5. Разновидности ультразвукового контроля:

а — теневой; б — зеркальный; в — эхо-метод раздельным искателем;
г — эхо-метод с совмещенным искателем

от частоты излучающего генератора. Схема наиболее часто применяемого наклонного совмещенного искателя приведена на рис. 12.6.

При контактном способе зазор между излучающей плоскостью искателя и поверхностью изделия заполняют контактирующей средой, в качестве которой применяются минеральные масла, солидол, вода, спирт, технический глицерин.

Иммерсионный контроль ведется при погружении контролируемого изделия в контактную среду; при этом толщина слоя контактирующей среды составляет более половины длины волнового пакета ультразвукового импульса, т. е. в этом случае исключается влияние толщины слоя контактирующей жидкости на интенсивность вводимой в изделие волны.

При поиске дефектов совмещенный искатель зигзагообразно перемещают вдоль контролируемого шва (рис. 12.7). К основным параметрам ультразвукового контроля (УЗК) относятся: выбор схемы прозвучивания, чувствительность контроля, тип искателя (совмещенный или раз-

дельный), угол ввода, частота ультразвука, мертвая зона, частота следования импульсов, скорость и шаг перемещения искателя (сканирование).

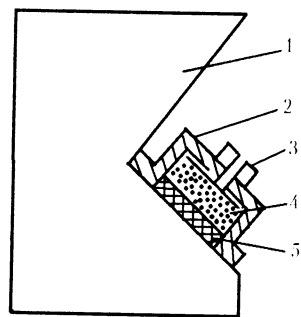


Рис. 12.6. Конструкция наклонного ультразвукового искателя:

1 - призма; 2 - корпус искателя; 3 - соединительные провода;
4 - демифер; 5 - пьезопластина

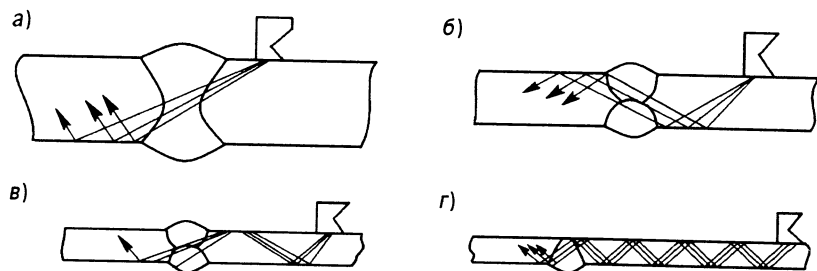


Рис. 12.7. Прозвучивание сварных соединений прямым (а), однократно отраженным (б), двукратно отраженным (в) и многократно отраженным (г) лучом

Признаком обнаружения дефекта при УЗК является прием эхо-сигнала, амплитуда которого превышает заданный уровень от отражателя (дефекта), расположенного в металле шва. Для получения необходимой информации о выявляемых дефектах используют следующие измеряемые характеристики дефекта: максимальную амплитуду эхо-сигнала от дефекта, координаты расположения дефекта в шве, условные размеры дефекта и их количество на принятой длине шва.

Чувствительность метода предполагает способность выявлять заданные дефекты определенного вида при данной настройке аппаратуры и принятой методике поиска.

Признаками наличия дефектов при УЗК являются:

- превышение амплитуды отраженного сигнала при заданном уровне фиксации (при эхо-методе);
- ослабление амплитуды прошедшего сигнала ниже заданного уровня (при теневом методе);
- ослабление амплитуды сигнала, отраженного от противоположной грани изделия (донного сигнала) или от какого-либо экрана (при зеркально-теневом методе).

Все указанные параметры определяются на экране катодной трубки прибора.

Существующие в настоящее время приборы УЗК позволяют измерять параметры, косвенно характеризующие местоположение и размеры дефектов по амплитуде отраженного или прошедшего сигнала, расстояния вдоль ультразвукового луча от точки ввода до отражающей поверхности дефекта (последняя характеристика действительна при эхо-методе).

Для оценки конкретных размеров дефекта (эквивалентной его площади) в зависимости от величины коэффициента затухания ультразвука в данном материале, диаметра отражателя и амплитуды сигнала существуют так называемые АРД-диаграммы. Эквивалентная площадь может в определенной мере характеризовать предельный (наименьший) размер мелких дефектов. Крупные дефекты характеризуют их так называемая условная протяженность l , условная ширина Δx и условная высота ΔH (рис. 12.8).

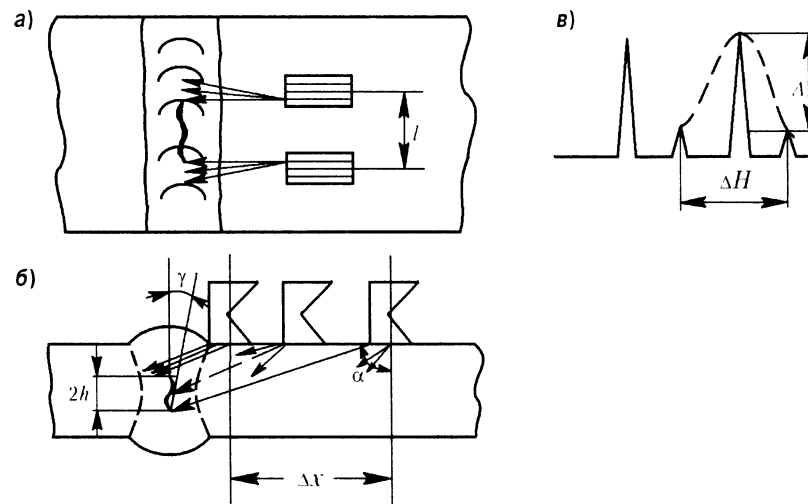


Рис. 12.8. Условные размеры дефекта:

a - длина (условная протяженность); b - ширина; c - высота

Условная протяженность характеризует размеры дефекта вдоль шва (в плане), а условные ширина и высота – размеры дефекта в сечении шва. Величину условной протяженности измеряют длиной зоны перемещения искателя вдоль шва, в пределах которого воспринимается эхосигнал от выявленного дефекта на экране катодной трубки прибора. Перемещая искатель нормально к шву, измеряют величину условной ширины дефекта, а величину условной высоты вычисляют по разнице интервалов времени между зондирующим и эхо-импульсом при крайних положениях искателя, между которыми измеряли условную ширину Δx . Допустимые дефекты, выявленные при УЗК, определяются соответствующими правилами контроля, а их характер, величина и количество диктуются ответственностью данной конструкции и условиями ее эксплуатации.

Ультразвуковая дефектоскопия широко применяется для сварных соединений разного рода конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей в толщинах вплоть до 500 мм. Очень часто, для контроля особо ответственных конструкций (корпуса подводных лодок), одновременно с этим способом применяется рентгеногаммаграфия, что объясняется необходимостью полного выявления дефектов сварных швов.

Считается, что высокая степень достоверности ультразвуковой дефектоскопии может быть достигнута путем автоматизации всего процесса контроля. В этом случае, наряду с механизацией сканирования, установки для контроля фиксируют его результаты с их автоматизированной оценкой.

12.4. МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

Общая схема электромагнитных методов контроля с непосредственной регистрацией изменения параметров поля приведена на рис. 12.9. В результате взаимодействия с объектом контроля поле приобретает структуру, характерную только для данного объекта. При появлении дефектов структура поля вблизи поверхности контролируемого объекта изменяется. Сравнивая эти изменения с эталоном, можно судить о наличии дефекта в измеряемом объекте.

По способу индикации первичной информации о параметрах электромагнитного поля различают схему контроля без преобразования ее в электрический сигнал (визуальный) и с преобразованием в электрический сигнал (метрический).

В первом случае информация о дефектах воспринимается непосредственно наблюдением косвенных изменений электромагнитного поля (например, осаждение поляризованных или намагниченных частиц на поверхности контролируемого изделия вблизи мест расположения дефектов (см. рис. 12.9)).

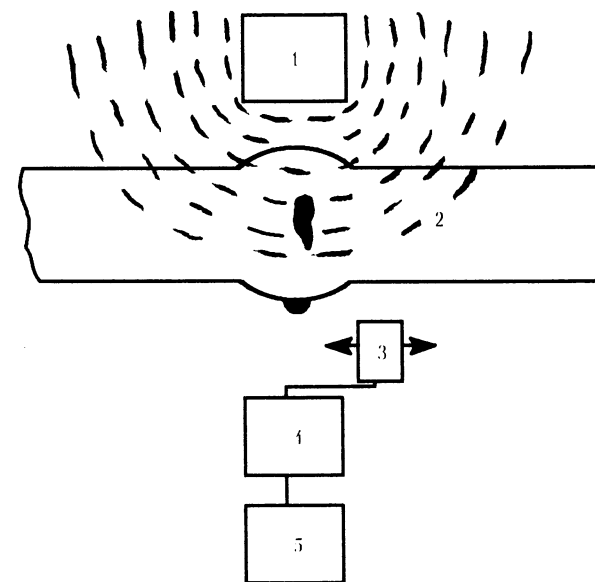


Рис. 12.9. Схема электромагнитного контроля с непосредственной регистрацией измерения параметров поля:

1 – полезадающая система; 2 – объект контроля; 3 – датчик;
4 – сканирующая система; 5 – измерительный прибор

Во втором случае контроль основан на преобразовании параметров электромагнитного поля в электрический сигнал, что делает схемы контроля, построенные по этому способу, более информативными. Они позволяют обнаружить не только дефекты материала, но и неравномерность его свойств, геометрические отклонения и т. д. Такие схемы контроля легко согласуются с системами автоматической обработки измерительной информации и с автоматизированными системами управления технологическими процессами.

Способы возбуждения полей могут быть различными. Для ферромагнитных сталей широко применяются магнитные (магнитостатичес-

кие) методы. Для токопроводящих ферромагнитных и магнитных материалов применяются электромагнитные (вихревые) методы. При первом методе над поверхностью изделия возникает поле рассеивания, которое обнаруживается скоплением металлического магнитного порошка, предварительно нанесенного на поверхность намагниченной детали.

Ферромагнитный порошок наносят в виде суспензии с керосином, маслом, мыльным раствором или в виде магнитного аэрозоля. Под действием втягивающей (пондеромоторной) силы магнитных полей рассеянные частицы порошка перемещаются по поверхности детали и скапливаются в виде валиков над дефектами; форма этих скоплений принимает очертания выявляемых дефектов.

Предельная чувствительность метода ограничена дефектами с раскрытием ≥ 2 мкм и глубиной ≥ 20 мкм. При этом поверхностные дефекты обнаруживаются лучше, чем подповерхностные (глубина залегания дефектов при достаточной чувствительности метода составляет 100 мкм). Метод достаточно универсален и прост в исполнении.

В качестве материала для изготовления порошков в основном используют мелко перемолотую закись-окись железа (Fe_3O_4) с размером частиц 5,0...10,0 мкм. Применяют также часто железную окалину, получаемую при ковке или прокатке, и стальные опилки, получаемые при шлифовке стальных изделий. После измельчения в шаровых мельницах и прогрева из них получают ферромагнитную пудру. Для приготовления магнитных суспензий чаще всего применяют масляно-керосиновые смеси.

При контроле изделие намагничивают (способов намагничивания много) и на его поверхность наносят магнитную суспензию. В дефекте происходит локализация поля, и металлические частицы затаскиваются в район дефекта, где концентрация магнитных линий высока; над дефектом образуется валик из порошковых частиц. При этом методе контроля применяют два способа – приложения поля и остаточной намагниченности. Для намагничивания изделий используют постоянный выпрямленный одно- и двухполупериодный импульсный и переменный ток, а также постоянные магниты.

Изделие намагничивают, пропуская через него ток (непосредственно или через проводник, помещенный в изделие), или путем полюсного намагничивания с помощью электромагнитов (постоянных магнитов) или соленоидов. Возможна комбинация этих видов намагничивания. Напряженность намагничивающего поля определяется заданной чувствительностью контроля, которая характеризуется размерами (шириной, глубиной и длиной), поверхностью

линейного дефекта в поле рассеивания, величина которого составляет $\leq 0,2$ мм.

Одной из разновидностей магнитных методов контроля является магнитографический метод. Сущность его заключается в намагничивании контролируемого участка сварного шва и ЗТВ с одновременной записью магнитного поля на предварительно размагниченную магнитную пленку и последующим считыванием с полученной на ленте магнитограммы с помощью специальных воспроизводящих устройств магнитографических дефектоскопов.

Таким методом контроля хорошо выявляются протяженные дефекты (трещины, непровары, цепочки и скопления пор и шлаковых включений), с преимущественной ориентацией поперек магнитного потока при намагничивании. Гораздо хуже выявляются одиночные газовые и шлаковые включения, особенно имеющие округлую форму.

Токовихревой контроль (ТВК) (электромагнитный или индукционный) основан на изменении электромагнитного поля вихревых токов в электропроводящих материалах в районе поверхностного дефекта. Ана-

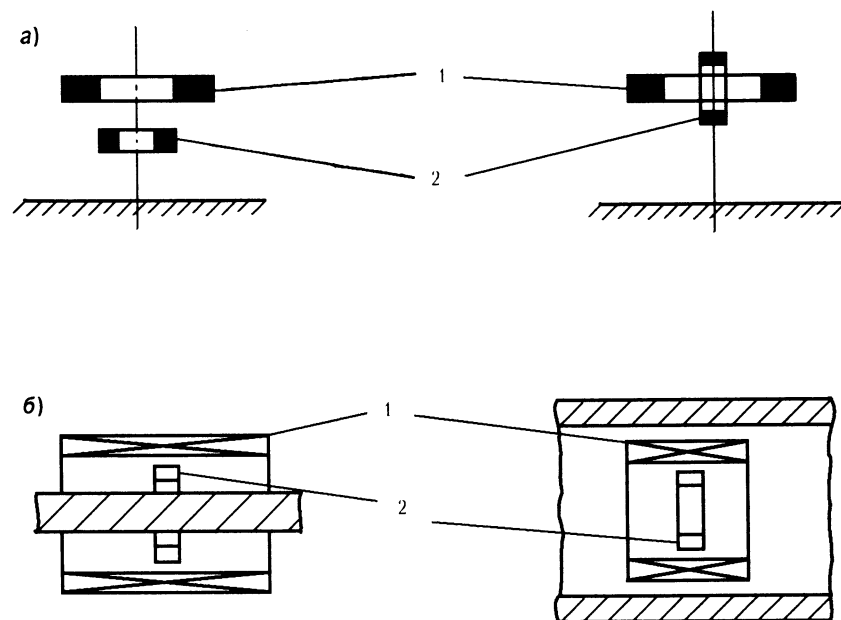


Рис. 12.10. Расположение накладных (а) и проходных (б) преобразователей:

1 – излучающие катушки; 2 – регистраторы вторичного поля

лиз этого изменения позволяет классифицировать дефект. Катушка преобразователя, помещенная у поверхности изделия, действуя электромагнитным полем, образует вихревые токи, текущие в поверхностном слое изделия по замкнутому контуру. Возникшее при этом электромагнитное поле вихревых токов наводит в катушке преобразователя ЭДС; регистрируя ее, можно получать информацию о свойствах поверхности контролируемого объекта.

Глубина контроля зависит от частоты электромагнитных колебаний, электромагнитных характеристик металла и других причин (формы катушки и поверхности изделия) и колеблется от долей миллиметра до 1,0...3,0 мм. Чувствительность ТВК зависит от ряда факторов; в лучшем случае выявляются трещины глубиной 0,1...0,2 мм протяженностью 1,0...2,0 мм.

Одним из преимуществ контроля является возможность его автоматизации и проведения процесса контроля с большой скоростью. Катушки преобразователей для контроля могут быть проходные и накладные (рис. 12.10).

Способ ТВК применяют в том случае, когда другие методы не обеспечивают выявления дефектов (контроль сплошности сварочной проволоки, внутренней поверхности поковок и труб).

12.5. КАПИЛЛЯРНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

Капиллярный контроль позволяет выявлять дефекты, выходящие на поверхность изделия (трещины, поры, раковины, непровары). Метод основан на физических процессах капиллярности, сорбции, диффузии, световом и цветовом контрастах. Дефекты обнаруживаются по ярко окрашенным (*цветной метод*) или светящимся в ультрафиолетовом свете (*люминесцентный метод*) индикаторным следам. Эти следы проявляются адсорбирующим покрытием в местах нарушения сплошности контролируемой поверхности.

Метод обнаруживает дефекты, невидимые невооруженным глазом. Под его абсолютной чувствительностью понимают среднее раскрытие трещин длиной от 0,1 мм, выявляемых с заданной вероятностью (обычно равной 0,95). Контролю подвергаются сварные швы (и поверхность основного металла) изделий из сталей, цветных металлов и легких сплавов конструкций различного назначения. Несмотря на простоту, метод дает надежные результаты при соблюдении следующих правил:

- контролируемая поверхность должна быть соответствующим образом подготовлена (обезжирена и высушена сжатым возду-

хом, иногда нагрета до 100 °С для полного удаления обезжиривающих растворов);

- на поверхность должен быть нанесен индикаторный пенетрант;
- после этого наносится, а затем сушится проявитель и производится осмотр контролируемой поверхности.

Индикаторный пенетрант на контролируемую поверхность наносится с помощью аэрозольного баллончика или окунанием детали в ванну с пенетрантом. В качестве последнего могут быть применены различные составы. В частности, в судостроении дефектоскопические комплексы регламентируются ОСТ 5.9537-80 и имеют 5 составов (И-1, И-2, И-5, И-6 и И-7). Так, индикаторный пенетрант И-5 состоит из 50 мл норила А и 950 мл бензина.

Технология нанесения пенетранта регламентируется специальными инструкциями. Затем на контролируемую поверхность наносится проявитель – он предназначен для извлечения индикаторного пенетранта из полости дефекта, которое происходит по мере испарения жидкой основы проявителя. При этом средняя ширина индикаторного слоя определяется в основном раскрытием поверхностной трещины. Сушка проявителя происходит за счет его естественного испарения. После его высыхания производится осмотр контролируемой поверхности (не ранее чем через 3...4 мин, лучше проводить дополнительный контроль через 15...20 мин, когда наступает стабилизация индикаторного следа).

При люминесцентном методе применяют ультрафиолетовое излучение с длиной волны 315...400 нм. Контроль проводят с полным (или частичным) затемнением. При цветном методе контроль проводят при естественном или искусственном освещении.

Под чувствительностью капиллярного метода контроля понимают размер минимального по величине (ширина, глубина и длина полости) дефекта, который надежно выявляется в конкретных условиях контроля. В соответствии с ГОСТ 18422-73 в зависимости от сочетания методов, способов их реализации, а также использования дефектоскопических материалов оценка чувствительности производится по четырем условным уровням. Уровень чувствительности связан с сочетанием светокolorистических, технологических и зрительных условий дефектоскопирования. Так, первый уровень соответствует выявлению дефектов по ширине менее 1 мкм, по длине до 0,1 мм, на глубине до 10 мкм.

Контроль герметичности. Под герметичностью понимают свойство конструкции препятствовать обмену газами или жидкостями между средами, разделенными стенками конструкции. Самым простым методом испытания на герметичность является керосиновая проба, которая

основана на высокой проникающей способности керосина. При этом способе одну сторону сварного соединения покрывают меловым раствором (обычно эта сторона доступна для осмотра и ремонта), а другую смачивают керосином. После выдержки 15...60 мин при наличии сквозного дефекта минимальным диаметром $(15...20) \cdot 10^{-5}$ м след керосина будет заметен на меловой поверхности.

Метод контроля с использованием *течеискателей* основан на обнаружении с помощью специальных течеискателей малого количества пробных веществ, проникающих через течь в изделия. В качестве пробных веществ используют гелий или аргон, которые обладают высокой проникающей способностью.

Регистрация проникших через течь пробных веществ происходит с помощью гелиевых или галоидных течеискателей. Чувствительным элементом первых является масс-спектрометр, настроенный на регистрацию ионов гелия, попадающих в его камеру. Для прохождения пробного вещества между объемами создается перепад давлений (вакуум в изделии или, наоборот, повышенное давление с подачей гелия). В первом случае швы обдувают гелием, и масс-спектрометр регистрирует его ионы, прошедшие через течь в объем, во втором – специальным гелиевым щупом улавливают ионы гелия, прошедшие через дефект из объема. Чувствительность метода весьма высокая. Технология такого способа контроля предусмотрена отраслевой технической документацией.

При *компрессионном* методе контроля создается перепад давления воздуха (или другого газа), и течь наблюдается при падении давления (или образовании пузырьков, если изделие находится в воде). Иногда в контролируемое изделие подают воздух, а швы обмывают.

Гидравлический метод контроля основан на создании давления пробной жидкости в объеме контролируемого изделия и наблюдении проникновения жидкости через стенки (шов). При гидравлическом методе воду под давлением подают в контролируемый объем, и при наличии течи появление воды наблюдают внешним осмотром.

При люминисцентно-гидравлическом методе в воде растворяют соли флуоресцентны, которые при облучении ультрафиолетовыми лучами светятся зеленым светом.

12.6. ПРАВИЛА ПРИМЕНЕНИЯ СВАРКИ В СУДОСТРОЕНИИ

В судостроительной промышленности нашей страны требования к сварным соединениям, сварочным материалам и технологии постройки судов определяет Российский Морской Регистр Судоходства.

Требования Регистра изложены в «Правилах классификации и постройки морских судов».

В соответствующих разделах Правил подробно изложены требования к материалам, технологиям и методам постройки судов. Они охватывают корпусостроение и судовое машиностроение.

Правила предусматривают требования к выбору материала для изготовления корпуса с условиями обеспечения его хорошей свариваемости. Даются указания по выбору сварочных материалов, оборудования, технологической последовательности проведения работ, контроля качества сварных соединений и их испытаний. Правила устанавливают применяемые способы сварки и порядок их одобрения Регистром. Излагаются требования к предприятиям, выполняющим сварочные работы, подготовке производства, проектной и технической документации.

В зависимости от степени ответственности основные и сварочные материалы разделены на категории, приведены требования к наплавленному металлу и сварным соединениям для каждой категории. Здесь же изложены требования к контролю сварочных операций, его организации и объему для различных способов сварки и категорий сварных конструкций.

В отдельном разделе Правил содержатся указания по методике определения свойств металла шва и сварного соединения. Они предусматривают определение лабораторным путем механических свойств, химического состава, стойкости против образования горячих трещин, металлографические исследования, определение коррозионной стойкости и другие испытания (например, квалификационные испытания сварщиков).

К наиболее распространенным испытаниям сварного соединения и металла шва относятся: на статическое растяжение, на статический изгиб, на ударный изгиб надрезанных образцов, вырезаемых из различных участков сварных соединений. Предусматриваются типы образцов, место их вырезки в зависимости от толщины свариваемого металла, типа разделки и т. д. Предусмотрены также типы проб для определения сопротивления сварного соединения к образованию трещин. Все виды испытаний связаны условиями работы и назначениями конструкции.

13. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВАРКЕ

13.1. СВАРОЧНАЯ ДУГА КАК ИСТОЧНИК ТЕПЛОТЫ

В судостроении основным технологическим процессом получения неразъемных соединений является электродуговая сварка. При всех ее разновидностях изделия подвергаются местному нагреву движущимся по поверхности изделия сосредоточенным источником теплоты – сварочной дугой. Теплота, введенная дугой, расплавляет кромки элементов изделия и, распространяясь вглубь металла вследствие его теплопроводности, устанавливает в изделии резко неравномерное температурное поле, перемещающееся вместе со сварочной дугой.

С достаточной для практики точностью можно считать, что полная тепловая мощность сварочной дуги равна тепловому эквиваленту ее электрической мощности:

$$q_0 = IU \text{ [Вт]}, \quad (13.1)$$

где I – сварочный ток, А; U – напряжение на дуге, В.

В то же время только часть полной тепловой мощности идет на нагрев изделия: это объясняется потерями в окружающее пространство, потерями на нагрев защитного газа, флюса и т. п. Эта часть теплоты называется эффективной тепловой мощностью:

$$q = \eta_{II} q_0 = \eta_{II} IU \text{ [Вт]}, \quad (13.2)$$

где η_{II} – эффективный КПД процесса нагрева изделия дугой.

Приведем величины η_{II} для различных способов сварки по экспериментальным данным.

Способ сварки	η_{II}
Ручная, электродами:	
плавящимися	0,7–0,8
угольными	0,5–0,75
Под флюсом	0,8–0,95
В защитных газах:	
углекислом	0,7–0,8
аргоне, электродом:	
вольфрамовым	0,6–0,7
плавящимся	0,7–0,8

Порошковой проволокой	0,8–0,9
Газовым пламенем	0,3–0,8

В сварочной практике нашло широкое применение понятие *погонной энергии сварки*, определяющее количество теплоты, вкладываемое сварочной дугой в единицу длины шва:

$$q_{II} = \frac{q}{v} \text{ [Дж/см]}, \quad (13.3)$$

где v – скорость сварки, см/с.

В действительности сварочная дуга, как естественный процесс, является поверхностным источником нагрева (рис. 13.1).

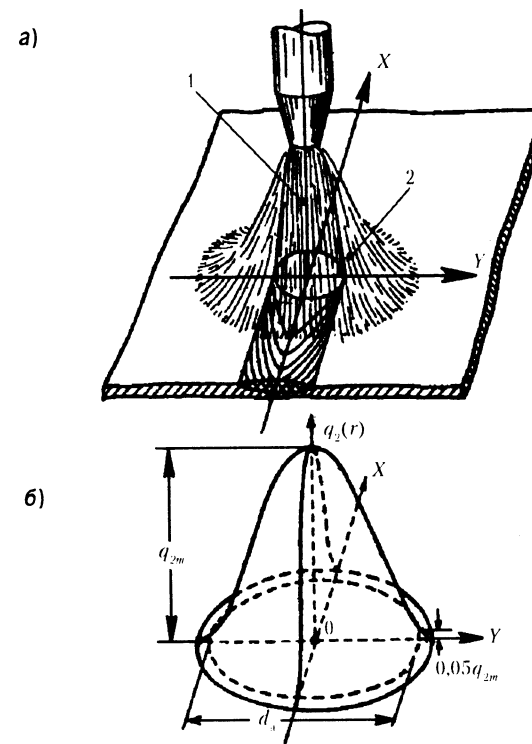


Рис. 13.1. Нагрев металла сварочной дугой:
 а – схема дуги: 1 – столб дуги, 2 – факел дуги;
 б – схема распределения теплового потока дуги

Тепловой поток сварочной дуги наиболее интенсивен в центральной части пятна нагрева, где происходит выделение теплоты в поверхностных слоях металла вследствие электронной и ионной бомбардировки. В периферийной области дуги металл нагревается за счет лучистого теплообмена со столбом дуги и конвективного теплообмена с горячими газами факела дуги. По мере удаления от центра пятна нагрева интенсивность теплового потока убывает. Распределение удельного теплового потока дуги с достаточной для практики точностью можно описать законом нормального распределения

$$q_2(r) = q_{2m} \exp[-kr^2], \quad (13.4)$$

где $q_2(r)$ – удельный тепловой поток, Вт/см² (индекс 2 указывает, что тепловой поток поверхностный); r – расстояние от оси источника, см; $r^2 = x^2 + y^2$; q_{2m} – максимальный удельный тепловой поток по оси источника (дуги), Вт/см²; k – коэффициент сосредоточенности удельного теплового потока источника, 1/см².

Таблица 13.1
Характеристики сварочных источников нагрева

Источник нагрева	Максимальная плотность теплового потока $q_{2m \max}$, кВт/см ²	Коэффициент сосредоточенности k , 1/см ²	Условный диаметр пятна нагрева d_n , см
Дуга неплавящегося угольного электрода	4–8,5	1–1,5	3,4–2,8
Дуга неплавящегося вольфрамового электрода в среде аргона	2–2,5	7–14	1,3–0,9
Дуга плавящегося электрода (металлический) открытая	4–8,5	1–1,5	3,4–2,8
Дуга плавящегося электрода (металлический) под флюсом	25	6–10	1,4–1,1
Газовое пламя	0,6	0,2–0,4	8,5–5,5

Локальность источника наглядно можно охарактеризовать условным диаметром пятна нагрева d_n [см], определяющим участок поверхности, где удельный тепловой поток превышает $0,05q_{2m}$ (см. рис. 13.1, б). В табл. 13.1 представлены характеристики удельных тепловых потоков некоторых сварочных источников нагрева, из которых следует, что степень локализации вводимой теплоты и максимальная плотность теплового потока в центре различных сварочных дуг значительно больше, чем при газосварочном пламени.

13.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ

При всех разновидностях процессов электродуговой сварки температурное состояние свариваемых металлов является неравномерным и может изменяться в различных объемах в весьма широком диапазоне температур: от -40 °С (при сварке на морозе) до температур, сопоставимых с температурой кипения металла, ~ 3000 °С. В этом широком диапазоне температур происходит ряд превращений в металле, в частности, его плавление с последующей кристаллизацией, структурные и полиморфные превращения, физико-химические процессы, объемные изменения и пр. Для понимания этих процессов и возможного управления ими следует иметь представление о законах нагрева и охлаждения металла при сварке. В данном разделе рассматривается возможность быстрой оперативной оценки наиболее важных тепловых процессов при сварке, базирующейся на теории, разработанной основоположником тепловых основ сварки Н. Н. Рыкалиным.

Для тепловых расчетов при сварке необходимо иметь представление об основных теплофизических величинах и процессах теплообмена.

Температура – физическая величина, характеризующая степень нагретости тела. Является скалярной величиной, измеряемой в градусах Цельсия [°С] или в кельвинах [К].

Количество теплоты Q , содержащееся в теле или выделяемое источником теплоты, выражается в джоулях [Дж]. Повышение температуры тела объемом V [см³] при поступлении в него теплоты Q определяется следующей взаимосвязью:

$$\Delta T = \frac{Q}{c\rho V}, \quad (13.5)$$

где c – удельная теплоемкость, Дж/г · °С; ρ – плотность, г/см³.

В тепловых расчетах часто применяют понятие объемной теплоемкости c_p [Дж/см³·°C].

Температурное поле – это совокупность значений температуры T во всех точках тела в определенный момент времени t :

$$T = T(x, y, z, t) \text{ при } t = \text{const.} \quad (13.6)$$

Температурное поле удобно характеризовать изотермами. Изотермические поверхности являются геометрическим местом точек тела, имеющих одинаковую температуру. Изотермические поверхности не могут пересекаться. Геометрические места точек пересечения изотермических поверхностей с какой-либо плоскостью называются изотермами.

При перемещении в неравномерно нагретом теле по направлению SS (рис. 13.2) температура непрерывно меняется, это изменение удобно характеризовать градиентом температуры по направлению SS , являющимся вектором [°C/см]:

$$\lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{T_1 - T_2}{\Delta S} = \frac{\partial T}{\partial S}. \quad (13.7)$$

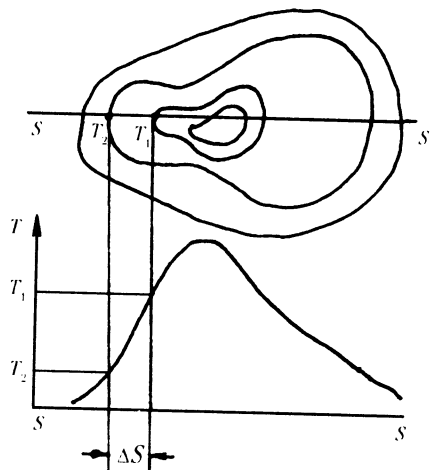


Рис. 13.2. Изображение температурного поля изотермами

Градиент температуры в любой точке неравномерно нагретого тела изменяется от нулевого значения (в направлении касательной к изотермической поверхности) до максимального (в направлении нормали к изотермической поверхности). Поэтому градиентом температуры в данной точке принято называть *вектор*, совпадающий с направлением наибольшего изменения температуры, нормальным к изотермической поверхности, и равный

$$\text{grad} T = \frac{\partial T}{\partial n}. \quad (13.8)$$

Положительное значение градиента соответствует возрастанию температуры.

Процесс распространения теплоты в твердом теле подчиняется закону теплопроводности Фурье. Чем больше изменяется температура по заданному направлению (чем больше градиент температуры), тем большее количество теплоты перетекает в этом направлении. В общем трехмерном случае закон теплопроводности Фурье для изотропного тела имеет вид

$$\bar{q} = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right), \quad (13.9)$$

где знак минус означает, что тепловой поток направлен в сторону уменьшения температуры; q – удельный тепловой поток (вектор), Дж/см²·с или Вт/см²; λ – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплопроводности, Дж/см·с·°C или Вт/см·°C*.

Процесс распространения теплоты в неравномерно нагретом теле подчиняется дифференциальному уравнению теплопроводности

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (13.10)$$

Данное уравнение не определяет значений температур, оно связывает пространственное распределение температуры с изменением температуры в теле во времени.

* 1 Вт/см·°C = 0,24 кал/см·с·°C;
1 кал/см·с·°C = 4,187 Вт/см·°C = 418,7 Вт/м·°C.

Если положить, что коэффициент теплопроводности λ и объемная теплоемкость $c\rho$ не зависят от температуры и координат (тело однородно), то уравнение (13.10) записывается в линеаризированном виде

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T, \quad (13.11)$$

где $\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа; $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – коэффициент температуропроводности, см²/с.

Для процесса стационарной теплопроводности $\left(\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \right)$ уравнение (13.11) примет вид

$$\nabla^2 T = 0.$$

В ряде случаев уравнение теплопроводности (13.11) можно упростить. Например, в пластине процесс распространения теплоты двумерный, температура по толщине в любой точке пластины одинакова, т. е. $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$. Уравнение (13.3) примет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right). \quad (13.12)$$

В стержне процесс распределения теплоты одномерный, т. е.

$\frac{\partial T}{\partial y} = 0; \frac{\partial T}{\partial z} = 0$. уравнение (13.11) примет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (13.14)$$

Хотя процесс распространения теплоты в теле удовлетворяет дифференциальному уравнению теплопроводности, которое в общем случае имеет множество решений, в то же время решение конкретной тепловой задачи должно быть единственным. Поэтому решение конкретной задачи должно удовлетворять не только дифференциальному

уравнению теплопроводности, но и краевым, т. е. начальным и граничным, условиям.

Начальное условие – задается начальное распределение температуры во всем объеме тела в определенный момент процесса $t=0$, принимаемый за начало отсчета времени:

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z). \quad (13.15)$$

Граничные условия – отражают взаимодействие поверхности (границы) тела с окружающей средой. В общем случае задается теплообмен поверхности S с окружающей средой по закону Ньютона:

$$\bar{q}|_S = \alpha_T (T_S - T_0). \quad (13.16)$$

Согласно закону Фурье [формула (13.9)], это условие можно записать

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_S = \alpha_T (T_S - T_0)$$

или

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_S = -\frac{\alpha_T}{\lambda} (T_S - T_0). \quad (13.17)$$

где α_T – коэффициент полной поверхностной теплоотдачи, Дж/см²·с·°С или Вт/см²·°С; T_S – температура поверхности, °С; T_0 – температура окружающей среды, °С.

Из условия (13.17) можно выделить предельные случаи теплообмена на поверхности тела с окружающей средой:

- *изотермическое условие* (изотермическая граница) представляет предельный случай теплообмена на поверхности при $\frac{\alpha_T}{\lambda} \rightarrow \infty$, т. е. когда коэффициент теплоотдачи настолько велик, а коэффициент теплопроводности настолько мал, что температура поверхности тела оказывается равной постоянной температуре окружающей среды: $T_S = T_0$;
- *адиабатическое условие* (адиабатическая граница) представляет другой предельный случай теплообмена на поверхности при $\frac{\alpha_T}{\lambda} \rightarrow 0$, когда тепловой поток через поверхность тела в окружающую

среду приближается к нулю: $\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_n = 0$, т. е. поверхность тела не пропускает теплоту в окружающую среду (непроницаемая граница).

По расчетной оценке процессов распространения теплоты в тонких пластинах и стержнях теплообмен с окружающей средой через их поверхности может быть очень существенным, и его влияние необходимо учитывать в практических расчетах.

Если считать, что теплообмен происходит по закону Ньютона, положив температуру окружающей среды равной нулю, т. е. $T_0 = 0$, то в дифференциальном уравнении теплопроводности для пластины малой толщины s (13.13) появится член, учитывающий теплообмен с окружающей средой:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - bT, \quad (13.18)$$

где $b = \frac{2\alpha_r}{c\rho s}$ — коэффициент температуропотдачи для пластины толщиной s , $1/с$.

Представим температуру пластины в виде произведения температуры $U(x, y, t)$ на безразмерный множитель $\exp[-bt]$, учитывающий свободное охлаждение пластины:

$$T(x, y, t) = U(x, y, t)\exp[-bt]. \quad (13.19)$$

Подставим выражение (13.9) в дифференциальное уравнение (13.18):

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} \exp[-bt] - bU \exp[-bt] &= a \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \times \\ &\times \exp[-bt] - bU \exp[-bt]. \end{aligned}$$

Приведя подобные члены и сократив на неравный нулю множитель $\exp[-bt]$, получим дифференциальное уравнение для температуры U

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right). \quad (13.20)$$

Из уравнения (13.20) и определения (13.19) видно, что $U(x, y, t)$ является решением дифференциального уравнения без теплоотдачи. Значит, если помножить решение задачи, полученное без учета теплоотдачи, на множитель $\exp[-bt]$, то будет учтен теплообмен с окружающей средой.

Такие же соображения можно развить и для температуры $T(x, t)$ в стержне, представив ее выражением, являющимся частным случаем выражения (13.19):

$$T(x, t) = U(x, t)\exp[-b_1 t], \quad (13.21)$$

где $b_1 = \frac{\alpha_r P}{c\rho F}$ — коэффициент температуропотдачи для стержня, $1/с$ (P — периметр теплоотдающей поверхности, см; F — площадь сечения стержня, см²).

Методы решения задач теплопроводности разделяют на аналитические и численные. Из аналитических методов наиболее часто используют метод Фурье, операторный метод и метод источников. Для расчетов применительно к сварке наиболее простым и наглядным является метод источников.

Физическая сущность метода источников заключается в том, что любой процесс распространения теплоты в теле можно представить в виде суммы элементарных процессов распространения теплоты от мгновенных источников теплоты, распределенных как в пространстве, так и во времени. Далее, используя принцип суперпозиции (наложения) решений, получаем общее решение задачи. Следует отметить, что принцип суперпозиции решений применим, если теплофизические свойства тела не зависят от температуры.

Эти элементарные процессы, используемые в методе источников, будут рассмотрены в подразд. 13.4.

13.3. ОСНОВНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ДОПУЩЕНИЯ В ИНЖЕНЕРНОЙ ТЕОРИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛОТЫ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

В действительности процессы распространения теплоты при электродуговых способах сварки чрезвычайно сложны, но для инженерных оценок этих процессов удобно применять упрощенные методы, позволяющие сводить конкретную задачу к идеальным расчетным схемам.

Все многообразие формы и размеров тел сводится к следующим расчетным схемам.

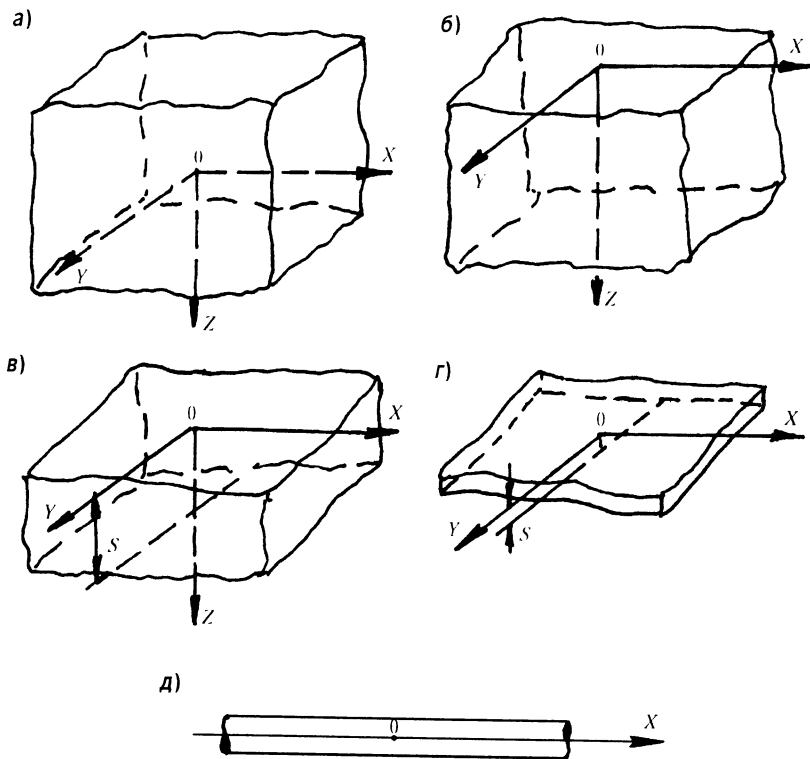


Рис. 13.3. Расчетные схемы тел:

a – бесконечное тело; *b* – полубесконечное тело; *в* – бесконечный плоский слой;
г – бесконечная пластина; *д* – бесконечный стержень

1. Бесконечное тело (рис. 13.3, *a*) – тело, не имеющее границ во всех направлениях, оно занимает область $-\infty < x < \infty$, $-\infty < y < \infty$, $-\infty < z < \infty$. Поток теплоты в теле пространственный, температурное поле трехмерное: $T(x, y, z, t)$.
2. Полубесконечное тело – тело, занимающее область по одну сторону плоскости в бесконечном теле: $-\infty < x < \infty$, $-\infty < y < \infty$, $0 < z < \infty$. Поток теплоты пространственный, температурное поле трехмерное: $T(x, y, z, t)$.
3. Бесконечный плоский слой – тело, ограниченное параллельными плоскостями $z = 0$ и $z = s$, занимает область $-\infty < x < \infty$, $-\infty < y < \infty$, $0 < z < s$. Поток теплоты пространственный, температурное поле трехмерное: $T(x, y, z, t)$.

4. Бесконечная пластина отличается от бесконечного плоского слоя только тем, что температуру по толщине слоя можно считать выравненной: $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$. Поток теплоты плоский, температурное поле двумерное: $T(x, y, t)$.
5. Бесконечный стержень представляет собой тело произвольного сечения в плоскости YOZ бесконечной длины: $-\infty < x < \infty$. В любом сечении тела по длине температура выравнена: $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$ и $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$. Поток теплоты линейный, температурное поле одномерное: $T(x, t)$.

Как уже отмечалось, сварочная дуга является поверхностно-распределенным источником теплоты (см. табл. 13.1), учет этой распределенности ввода теплоты затрудняет получение решений, удобных для непосредственных расчетов. Поэтому в инженерной практике применяют различные упрощающие схемы точечного, линейного и плоского источников теплоты. Эти упрощения дают значительные искажения температурных полей только в непосредственной близости от оси источника, вне пределов условного пятна нагрева действительного источника они дают уже удовлетворительную для практики сходимость с реальными температурными полями.

1. Точечный источник – теплота вводится в элементарный объем $dx dy dz$ [см³], например, при нагреве дугой все вводимое в изделие тепло считают введенным в точку, геометрически расположенной в центре пятна нагрева.
2. Линейный источник – теплота вводится в элементарный объем $dx dy z$ [см³], в этом случае можно считать, что теплота сконцентрирована в призме бесконечно малого сечения $dx dy$ [см²] и длиной, например, $z = s$ в случае пластины толщиной s [см].
3. Плоский источник – теплота вводится в элементарный объем $dx F$ [см³], где F – площадь некоторой плоскости, см², например площадь поперечного сечения стержня.

По длительности действия различают:

- a) мгновенный источник теплоты – это источник, длительность действия которого стремится к нулю;
- б) непрерывнодействующий источник теплоты – это источник постоянной тепловой мощности, действующий непрерывно или достаточно длительно.

По ориентации в теле различают:

- a) неподвижный источник теплоты;
- б) подвижный источник теплоты – это источник постоянной мощ-

ности, перемещаемый в теле или по поверхности тела прямолинейно и с постоянной скоростью.

В заключение оговорим допущения, принятые в инженерной теории распространения теплоты при электродуговой сварке.

1. Расчетные схемы источников теплоты назначаются в соответствии с выбранной расчетной схемой тела:
 - для полубесконечного тела и бесконечного плоского слоя – точечный источник;
 - для бесконечной пластины – линейный;
 - для бесконечного стержня – плоский.
2. Теплофизические свойства металла: коэффициенты теплопроводности λ , объемной теплоемкости c_p , поверхностной теплоотдачи α_T – не зависят от температуры. Рекомендации по выбору теплофизических величин приведены в табл. 13.2.

Таблица 13.2

Значения теплофизических констант, используемых в тепловых расчетах, применительно к сварке (по литературным данным)

Материал	Температурный интервал, °C	Коэффициент теплопроводности λ , Дж/см·с·°C	Объемная теплоемкость c_p , Дж/см ³ ·°C	Коэффициент температуропроводности a , см ² /с	Коэффициент поверхностной теплоотдачи α_T , Дж/см ² ·с·°C
Малоуглеродистые и низколегированные стали	450–550	0,38–0,42	4,1–4,8	0,08–0,10	(3–5)·10 ⁻³
Хромоникелевые аустенитные стали	600–700	0,23–0,28	4,0–5,0	0,046–0,07	(5–8)·10 ⁻³
Алюминиевые сплавы АМг-5, АМг-6	300–400	1,35–1,45	2,8–2,9	0,46–0,52	(2–4)·10 ⁻³
Технический титан	700–800	0,12–0,17	2,6–2,8	0,043–0,065	(7–9)·10 ⁻³

3. Граничная плоскость полубесконечного тела и граничные плоскости бесконечного плоского слоя непроницаемы для теплоты (адиабатическая граница). Учет теплообмена с окружающей средой граничных плоскостей пластины и боковой поверхности стержня возможен [см. формулы (13.19) и (13.21)].

4. Структурные и фазовые превращения происходят без выделения или поглощения теплоты.
5. За начало отсчета температуры (если она не оговаривается) принимается исходная температура тела и окружающей среды, равная нулю ($T_0 = 0$).

13.4. МГНОВЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ТЕПЛОТЫ

Рассмотрим три основные схемы мгновенных источников теплоты: точечный, линейный, плоский в бесконечном теле.

Действие мгновенного точечного источника в бесконечном теле

Пусть в бесконечном теле (теле, не имеющем границ) в начальный момент времени $t = 0$ в объем $dxdydz$ [см³] (точечный источник), находящийся в точке 0 системы координат XYZ, вводится конечное количество теплоты Q [Дж] (рис. 13.4, а). Нас интересует изменение температуры в любой точке пространства в последующие моменты времени $T(x, y, z, t)$, где x, y, z – координаты произвольно выбранной точки А.

Процесс распространения теплоты в теле должен подчиняться дифференциальному уравнению теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T.$$

Начальные условия: в начальный момент времени $t = 0$ распределение температуры в пространстве будет:
– в точке 0 согласно формуле (13.5)

$$T(0, 0, 0, 0) = \frac{Q}{c_p dx dy dz} \rightarrow \infty;$$

– в остальных точках пространства

$$T(x, y, z, 0) = 0.$$

Граничные условия отсутствуют, так как тело не имеет границ. Решение этой задачи имеет вид

$$T(R, t) = \frac{Q}{c_p (4\pi a t)^{3/2}} \exp\left[-\frac{R^2}{4at}\right], \quad (13.22)$$

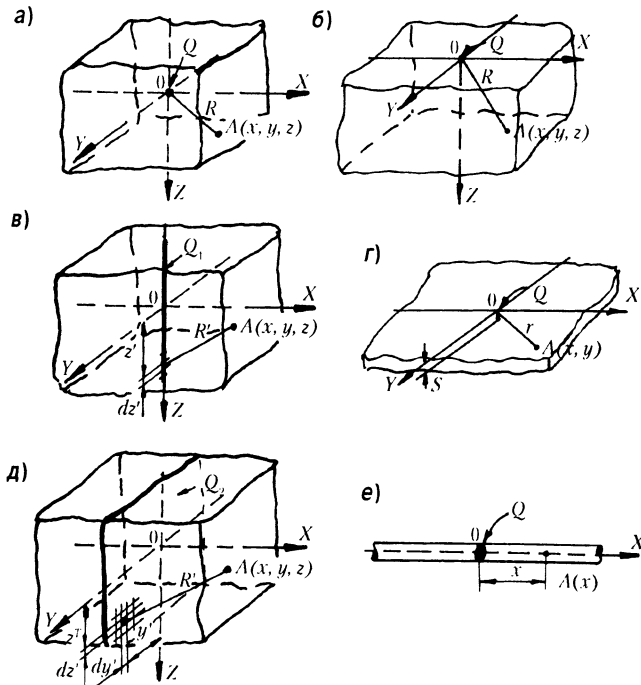


Рис. 13.4. Действие мгновенных источников теплоты:

a – точечного источника в бесконечном теле; *б* – точечного источника в полубесконечном теле; *в* – линейного источника в бесконечном теле; *г* – линейного источника в пластине; *д* – плоского источника в бесконечном теле; *е* – плоского источника в стержне

где R – пространственный радиус-вектор, характеризующий отстояние любой точки тела (например, точки $A(x, y, z)$) от источника теплоты: $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$.

Решение (13.22) получило название фундаментального решения общей теории теплопроводности. Анализ этого решения показывает, что процесс распространения теплоты является трехмерным, изотермические поверхности представляют собой сферы с центром в точке 0.

Частный случай: действие мгновенного точечного источника на поверхности полубесконечного тела.

В предположении, что граница XOZ полубесконечного тела (рис. 13.4, б) является адиабатической, т. е. не пропускающей теплоту:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{XOZ} = 0, \text{ – решение этой задачи будет иметь вид}$$

$$T(R, t) = \frac{2Q}{c\rho(4\pi at)^{3/2}} \exp\left[-\frac{R^2}{4at}\right], \quad (13.23)$$

где множитель 2 указывает на отсутствие половины бесконечного тела при наличии адиабатической границы.

Действие мгновенного линейного источника в бесконечном теле

Пусть в начальный момент времени $t = 0$ в линейный элемент объема, представляющий бесконечную призму с бесконечно малым сечением $dx dy$ [см^2] и с осью, совпадающей с осью OZ (линейный источник), вводится теплота с равномерной линейной интенсивностью Q_1 [Дж/см] (рис. 13.4, в).

Для решения этой задачи применим метод источников. Можно положить, что мгновенный бесконечный линейный источник эквивалентен бесконечному количеству мгновенных точечных источников интенсивностью $Q = Q_1 dz'$ [Дж], расположенных по оси OZ от $-\infty$ до $+\infty$. Элементарное повышение температуры от любого выделенного мгновенного точечного источника можно определить по формуле (13.22). Просуммировав действие всех мгновенных точечных источников, получим решение задачи

$$T(R, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{Q_1 dz'}{c\rho(4\pi at)^{3/2}} \exp\left[-\frac{R'^2}{4at}\right] = \frac{Q_1}{c\rho(4\pi at)^{3/2}} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{4at}\right] \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{(z - z')^2}{4at}\right] dz', \quad (13.24)$$

где R' – пространственный радиус-вектор, характеризующий отстояние точки A от выделенного точечного источника с координатами $(0, 0, z')$: $R'^2 = x^2 + y^2 + (z - z')^2$.

Определенный интеграл в выражении (13.24) подстановкой $U^2 = \frac{(z - z')^2}{4at}$ сводится к известному интегралу

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp[-U^2] dU = 2 \int_0^{+\infty} \exp[-U^2] dU = \sqrt{\pi}.$$

После преобразований решение примет вид

$$T(r, t) = \frac{Q_1}{4\pi\lambda t} \exp\left[-\frac{r^2}{4at}\right], \quad (13.25)$$

где r – плоский радиус-вектор, характеризующий отстояние точки A от оси OZ : $r^2 = x^2 + y^2$.

Анализируя решение (13.25), видим, что процесс распространения теплоты является двумерным (плоским), изотермические поверхности представляют собой цилиндры с осью OZ .

Частный случай: действие мгновенного линейного источника в бесконечной пластине.

Пусть в начальный момент времени $t = 0$ конечное количество теплоты Q [Дж] вводится в элементарный объем $dx dy z$ [см³] (линейный источник) (рис. 13.4, z).

Воспользуемся решением (13.25), в котором:

- интенсивность линейного источника $Q_1 = \frac{Q}{s}$ [Дж/см];
- учтем теплообмен поверхностями бесконечной пластины с окружающей средой [формула (13.19)].

Окончательно решение примет вид

$$T(r, t) = \frac{Q}{4\pi\lambda st} \exp\left[-\frac{r^2}{4at} - bt\right], \quad (13.26)$$

где $r^2 = x^2 + y^2$.

Действие мгновенного плоского источника в бесконечном теле

Пусть в начальный момент времени $t = 0$ в плоский элемент объема, представляющий бесконечный в плоскости YOZ слой толщиной dx [см] (плоский источник), вводится теплота с равномерной плоской интенсивностью Q_2 [Дж/см²] (рис. 13.4, δ).

Применим метод источников. Можно положить, что мгновенный плоский источник эквивалентен бесконечному количеству мгновенных точечных источников интенсивностью $Q = Q_2 \cdot \phi' \cdot dz'$ [Дж], расположенных в плоскости YOZ . Элементарное повышение температуры от любого выделенного мгновенного точечного источника можно определить по формуле (13.22). Просуммировав действие всех мгновенных точечных источников, получим решение задачи

$$T(R, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{Q_2 dy' dz'}{c\rho(4\pi at)^{3/2}} \exp\left[-\frac{R'^2}{4at}\right] = \frac{Q_2}{c\rho(4\pi at)^{3/2}} \exp\left[-\frac{x^2}{4at}\right] \times \\ \times \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{(y-y')^2}{4at}\right] dy' \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{(z-z')^2}{4at}\right] dz', \quad (13.27)$$

где R' – пространственный радиус-вектор, характеризующий отстояние точки A от выделенного точечного источника с координатами $(0, y', z')$: $R'^2 = x^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2$.

Определенные интегралы в выражении (13.27) идентичны интегралу, рассмотренному в формуле (13.24).

После преобразований решение примет вид

$$T(x, t) = \frac{Q_2}{c\rho(4\pi at)^{1/2}} \exp\left[-\frac{x^2}{4at}\right], \quad (13.28)$$

где x – абсцисса, характеризующая отстояние точки A от плоскости YOZ .

Анализируя решение (13.28), видим, что процесс распространения теплоты является одномерным (линейным), изотермические поверхности представляют собой плоскости, параллельные плоскости YOZ .

Частный случай: действие мгновенного плоского источника в бесконечном стержне.

Пусть в начальный момент времени конечное количество теплоты Q [Дж] вводится в элементарный объем $dx F$ [см³] (плоский источник) (рис. 13.4, e).

Воспользуемся решением (13.28), в котором:

- интенсивность плоского источника $Q_2 = \frac{Q}{F}$ [Дж/см²], где F – площадь поперечного сечения стержня, см²;
- учтем теплообмен поверхности стержня с окружающей средой [формула (13.21)].

Окончательное решение примет вид

$$T(x, t) = \frac{Q}{c\rho F(4\pi at)^{1/2}} \exp\left[-\frac{x^2}{4at} - b_1 t\right]. \quad (13.29)$$

В заключение следует отметить, что полученные решения (13.23),

(13.26), (13.29) являются основой для получения решений, связанных с нагревом изделий в процессе сварки подвижными сосредоточенными источниками. В некоторых случаях, когда время действия сварочного источника теплоты незначительно, для инженерных оценок возникающих при этом температурных полей эти решения можно использовать непосредственно, например: при точечной сварке, приварке шпилек, постановке коротких прихваток и в некоторых других случаях.

13.5. ПОДВИЖНЫЕ СОСРЕДОТОЧЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОСТОЯННОЙ МОЩНОСТИ

Для получения основных решений воспользуемся методом источников, т. е. любой подвижный источник (точечный, линейный) представим как последовательность действующих и смещенных относительно друг друга мгновенных источников. Далее, используя принцип суперпозиции, для получения окончательных решений конкретных задач просуммируем действия элементарных процессов.

Подвижный точечный источник на поверхности полубесконечного тела

Пусть в начальный момент времени $t = 0$ в точке 0_0 (неподвижной системы координат X_0, Y_0, Z_0 , связанной с телом) начинает действовать точечный источник постоянной мощности q [Дж/с] и перемещаться в направлении оси 0_0X_0 с постоянной скоростью v [см/с] (рис. 13.5). В какой-то момент времени t источник будет находиться в точке 0 . Действие подвижного непрерывно действующего точечного источника на момент t эквивалентно действию последовательно действующих и смещенных относительно друг друга мгновенных точечных источников интенсивностью $Q = qdt = q \frac{dx}{v}$ [Дж]. Например, выделенный на рис. 13.5 мгновенный точечный источник начал действовать в момент времени t' (находиться на расстоянии vt' от начала неподвижной системы координат 0_0). На момент времени t этот мгновенный источник за время $(t - t')$ вызовет изменение температуры в точке $A(x_0, y_0, z_0)$, равное, согласно решению (13.23):

$$dT(x_0, y_0, z_0, t) = \frac{2qdt'}{\text{cp} [4\pi a(t-t')]^{3/2}} \exp\left[-\frac{R^2}{4a(t-t')}\right], \quad (13.30)$$

где $R^2 = (x_0 - vt')^2 + y_0^2 + z_0^2$ – квадрат пространственного радиуса-векто-

ра, характеризующего расстояние точки A от выделенного мгновенного точечного источника в неподвижной системе координат X_0, Y_0, Z_0 .

Полное изменение температуры в точке A на момент t будет равно суммарному действию всех сосредоточенных точечных источников на пути 0_00 :

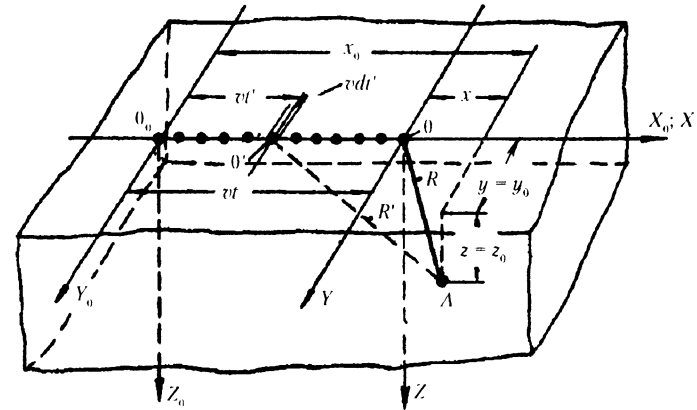


Рис. 13.5. Схема подвижного непрерывно действующего точечного источника на поверхности полубесконечного тела

$$T(x_0, y_0, z_0, t) = \int_0^t \frac{2qdt'}{\text{cp} [4\pi a(t-t')]^{3/2}} \exp\left[-\frac{R^2}{4a(t-t')}\right]. \quad (13.31)$$

Перейдя к подвижной системе координат XYZ , связанной с источником (координаты точки $A(x_0, y_0, z_0)$ в подвижной системе координат будут: $x = x_0 - vt, y = y_0, z = z_0$), и введя новую переменную $t'' = t - t'$, после преобразований получим

$$T(x, y, z, t) = \frac{2q}{\text{cp} (4\pi a)^{3/2}} \times \exp\left[-\frac{vx}{2a}\right] \int_0^t \frac{dt''}{t''^{3/2}} \exp\left[-\frac{v^2 t''}{4a} - \frac{R^2}{4at''}\right], \quad (13.32)$$

где R – пространственный радиус-вектор, характеризующий расстояние

точки A от начала координат O в подвижной системе координат XYZ :
 $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$.

Подвижный линейный источник в пластине

Рассуждаем, как и выше, что действие подвижного непрерывно действующего линейного источника в пластине на момент t эквивалентно действию последовательно действующих и смещенных относительно друг друга мгновенных линейных источников. Используя решение (13.26) и проведя соответствующие преобразования, получим решение задачи в подвижной системе координат

$$T(x, y, t) = \frac{q}{4\pi\lambda s} \exp\left[-\frac{vx}{2a}\right] \int_0^t \frac{dt''}{t''} \times \\ \times \exp\left[-\left(\frac{v^2}{4a} + b\right)t'' - \frac{r^2}{4at''}\right], \quad (13.33)$$

где r – плоский радиус-вектор, характеризующий отстояние точки A от начала координат O в подвижной системе координат XY : $r^2 = x^2 + y^2$.

Полученные решения (13.32) и (13.33) являются расчетными, хотя непосредственный расчет по этим формулам имеет определенные трудности. В то же время данные решения могут быть преобразованы.

Как показывает практика электродуговой сварки, возникающая в начале нагрева область повышенных температур вокруг источника с течением времени увеличивается и достигает определенных предельных размеров. Поэтому процесс нагрева подвижным источником постоянной мощности можно разделить на два периода:

I период – теплонасыщение, когда размеры связанной с источником нагретой зоны увеличиваются;

II период – предельное состояние процесса распространения теплоты, когда вокруг источника образуется неизменяемое температурное поле, перемещающееся вместе с источником (температурное поле предельного состояния называют также квазистационарным).

Период теплонасыщения для мощных сварочных дуг, например при автоматической сварке под флюсом, соизмерим с несколькими секундами, для менее мощных дуг, например при ручной электродуговой сварке покрытыми электродами, – со многими секундами. Поэтому при ручной сварке сварщик, зажигая дугу, задерживает дугу до образования ванны жидкого металла требуемых размеров и

только после этого начинает перемещение, формируя сварной шов. Действенной мерой при выполнении автоматных швов является выведение начала шва за пределы конструкции (выводные планки): период теплонасыщения приходится на то время, пока дуга горит на выводной планке за пределами конструкции.

В то же время теоретически процесс распространения теплоты стремится к предельному состоянию при неограниченно длительном действии источника постоянной мощности, т. е. при $t \rightarrow \infty$. На этом основании вернемся к ранее полученным решениям.

1. Полубесконечное тело.

Уравнение предельного состояния процесса распространения теплоты при нагреве поверхности полубесконечного тела подвижным точечным источником теплоты, отнесенное к подвижной системе координат, получим из уравнения (13.32), полагая верхний предел интегрирования $t = \infty$. Интеграл в этом уравнении, взятый между пре-

делами 0 и ∞ , можно привести подстановкой $\frac{R^2}{4at''} = u^2$ и обозначением

$\frac{vx}{4a} = m$ к известному интегралу

$$\int_0^{\infty} \exp\left[-u^2 - \frac{m^2}{u^2}\right] du = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \exp[-2m]. \quad (13.34)$$

После преобразований уравнение предельного состояния процесса распространения теплоты примет вид

$$T(R, x) = \frac{q}{2\pi\lambda R} \exp\left[-\frac{vx}{2a} - \frac{vR}{2a}\right], \quad (13.35)$$

где R – пространственный радиус-вектор в подвижной системе координат, указывающий на трехмерность процесса распространения теплоты: $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$; x – абсцисса, указывающая направление движения источника по оси Ox .

Расчетное температурное поле предельного состояния представлено на рис. 13.6.

2. Пластина.

Уравнение предельного состояния процесса распространения теплоты при нагреве пластины подвижным линейным источником теплоты, отнесенное к подвижной системе координат, получим из уравнения

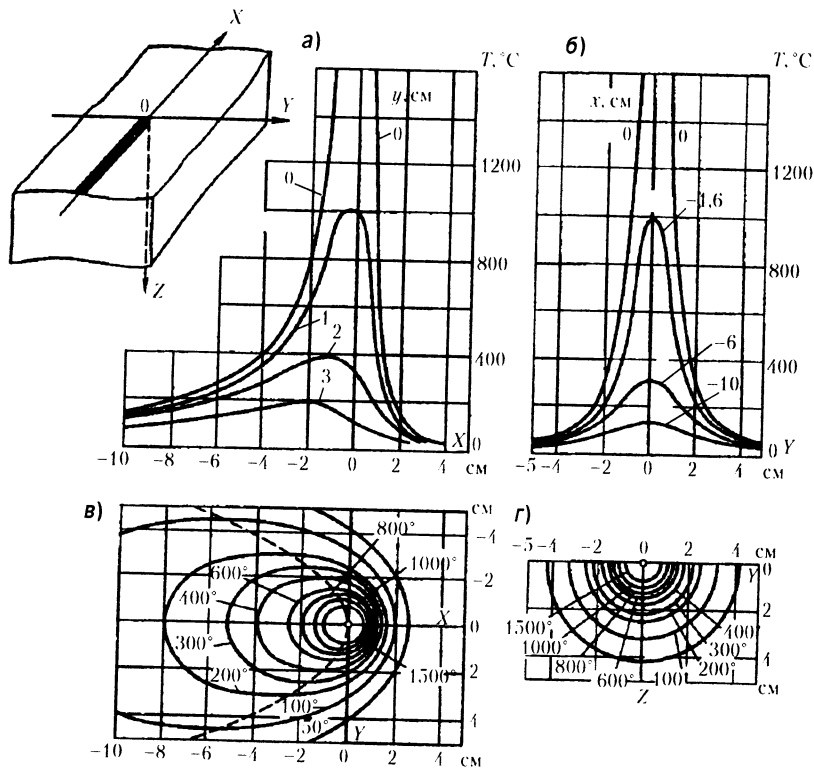


Рис. 13.6. Расчетное температурное поле предельного состояния при дуговой наплавке валика на массивное стальное изделие: $q = 4200$ Вт, $v = 0,1$ см/с:
 а – распределение температуры на поверхности $X0Y$ по прямым, параллельным оси OX ; б – распределение температуры на поверхности $X0Y$ по прямым, перпендикулярным оси OX ; в, г – изотермы в плоскостях $X0Y$ и $Y0Z$

(13.33), полагая верхний предел интегрирования $t = \infty$. Интеграл в этом уравнении, взятый между пределами 0 и ∞ , можно привести подстановкой

$\left(\frac{v^2}{4a} + b\right)t'' = \alpha$ и обозначением $r^2 \left(\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}\right) = u^2$ к известному интегралу

$$\int_0^{\infty} \frac{d\alpha}{\alpha'} \exp\left[-\alpha' - \frac{u^2}{4\alpha'}\right] = 2K_0(u), \quad (13.36)$$

где $K_0(u)$ – функция Бесселя второго рода нулевого порядка.

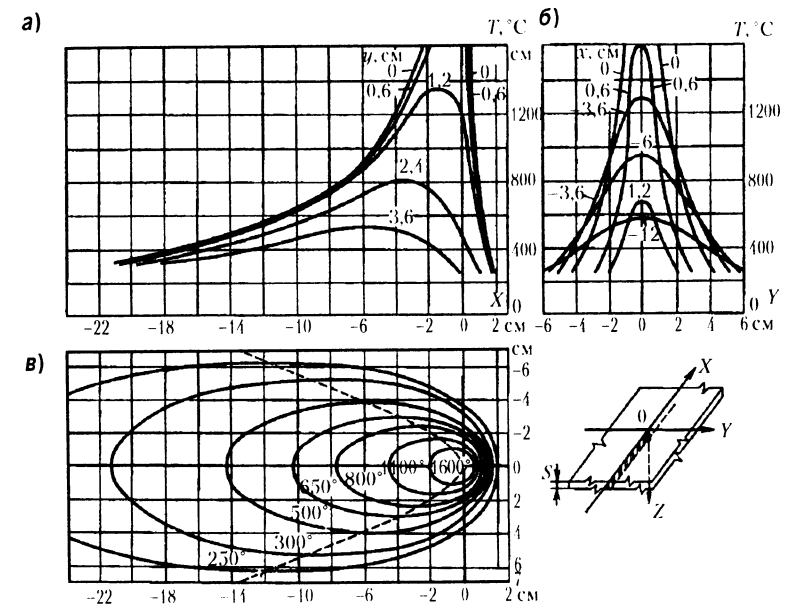


Рис. 13.7. Расчетное температурное поле предельного состояния при дуговой сварке встык стальных листов толщиной 10 мм: $q = 4200$ Вт; $v = 0,1$ см/с:
 а – распределение температуры на поверхности $X0Y$ по прямым, параллельным оси OX ; б – распределение температуры на поверхности $X0Y$ по прямым, перпендикулярным оси OX ; в – изотермы в плоскости $X0Y$

После преобразований уравнение предельного состояния процесса распространения теплоты примет вид

$$T(r, x) = \frac{q}{2\pi\lambda s} \exp\left[-\frac{vx}{2a}\right] K_0\left(r \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}\right), \quad (13.37)$$

где r – плоский радиус-вектор в подвижной системе координат, указывающий на двумерность процесса распространения теплоты: $r^2 = x^2 + y^2$; x – абсцисса, указывающая направление движения источника по оси OX .

Расчетное температурное поле предельного состояния представлено на рис. 13.7.

Полученные решения (13.35) и (13.37) могут быть рекомендованы для непосредственных расчетов температурных полей предельного состояния при всех разновидностях электродуговой сварки, как ручной, так и автоматической (полученные решения справедливы для любых скоростей движения источника, даже очень малых, вплоть до нулевых). При однопроходной наплавке на лист значительной толщины рекомендуется расчет по формуле (13.35); при однопроходной сварке листов с полным или почти полным проплавлением – расчет по формуле (13.37).

Замечание к расчету по формуле (13.37). $K_0(u)$ – функция Бесселя второго рода нулевого порядка, с увеличением аргумента u она убывает несколько медленнее, чем функция $\frac{1}{u} \exp(-u)$. При $u \rightarrow 0$ $K_0(u) \rightarrow \infty$, при $u \rightarrow \infty$ $K_0(u) \rightarrow 0$. Для значений аргумента от 0 до 10 имеются таблицы. Для вычисления $K_0(u)$ при больших значениях аргумента удобно представить функцию Бесселя в виде ряда

$$K_0(u) = \sqrt{\frac{\pi}{2u}} \exp(-u) \left[1 - \frac{1}{8u} + \frac{1 \cdot 3^2}{2!(8u)^2} - \frac{1 \cdot 3^2 \cdot 5^2}{3!(8u)^3} + \dots \right].$$

Этот ряд удобен для вычисления этой функции при больших значениях аргумента, так как погрешность от отбрасывания любого числа членов ряда есть величина одного порядка с первым из отброшенных членов. При $u > 2,5$ погрешность не превысит 1%, если удержать первые три члена ряда, а при $u > 12$ ту же точность дает только первый член ряда.

13.6. НАГРЕВ МОЩНЫМИ БЫСТРОДВИЖУЩИМИСЯ ИСТОЧНИКАМИ

Увеличение скорости сварки (повышение производительности) при соответствующем повышении эффективной тепловой мощности сварочной дуги (высокоамперная сварочная дуга) при условии, что величина погонной энергии сварки изменяется незначительно, – тенденция развития электродуговой сварки в XX веке и в настоящее время, нашедшая отражение в появлении автоматической и полуавтоматической сварки. Исторически оправдано появление термина *мощный быстро движущийся источник*, понятие которого может быть записано следующим образом:

$$q \rightarrow \infty, v \rightarrow \infty, \frac{q}{v} = q_{II} = \text{const.}$$

При нагреве мощным быстро движущимся источником наблюдаются некоторые особенности в температурном поле предельного состояния. По мере увеличения скорости v перемещения точечного или линейного источника теплоты и при пропорциональном увеличении его эффективной тепловой мощности q размеры зон, нагретых до определенной температуры, увеличиваются; длина зон увеличивается пропорционально мощности, а ширина возрастает, стремясь к определенному пределу. Позади источника нагретая область располагается узкой полосой, изотермические поверхности (изотермы) практически параллельны оси перемещения источника, градиент температуры в направлении оси перемещения источника практически равен нулю: $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$. Это позволяет сделать вполне правомерные допущения:

- позади источника в области, близкой к оси перемещения источника, теплота распространяется только в направлении, перпендикулярном к оси перемещения источника; перетекание теплоты вдоль оси перемещения источника практически отсутствует;
- впереди источника теплота практически не распространяется.

Эти допущения позволяют упростить расчетные схемы для получения основных решений по оценке температурных полей предельного состояния.

1. Подвижный точечный источник на поверхности полубесконечного тела.

Представим, что полубесконечное тело состоит из бесконечного количества тонких полубесконечных слоев (пластин) толщиной dx , ориентированных перпендикулярно к будущей оси перемещения источника (рис. 13.8, а). Далее, перемещаясь по поверхности полубесконечного тела в направлении оси OX , точечный источник, пересекая по торцам выделенные слои, сообщает им мгновенные количества теплоты, равные $Q = qdt = q \frac{dx}{v}$, которые распространяются только в пределах выделенных слоев, так как по сделанному выше допущению все слои в тепловом отношении изолированы: $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$. Таким образом, процесс распространения теплоты в каждом слое идентичен действию мгновенного линейного источника в пластине, а отличается в каждом слое только началом действия мгновенного источника. За начальный момент времени принимают момент пересечения источником слоя ($x = 0, t = 0$) и,

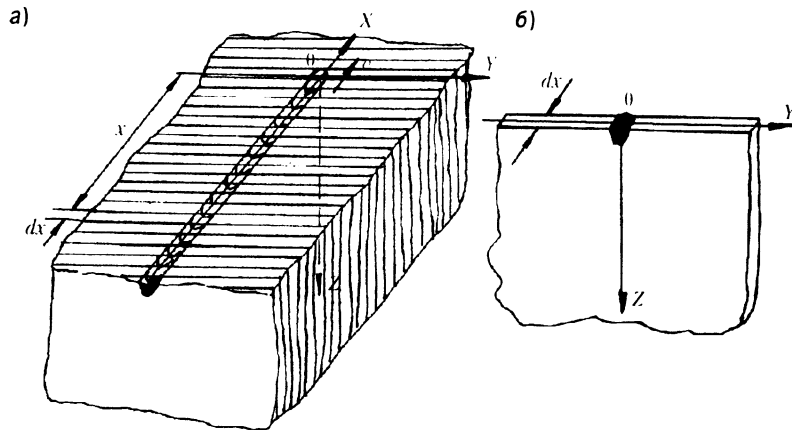


Рис. 13.8. Схема представления полубесконечного тела как пакета слоев толщиной dx , в тепловом отношении изолированных друг от друга: a – схема полубесконечного тела; b – расчетная схема полубесконечной пластины толщиной dx

как следует из рис. 13.8, a , для слоя, находящегося на расстоянии $(-x)$ позади от источника, от начала действия в нем мгновенного источника прошло время, равное $t = \frac{-x}{v}$ (знак минус означает, что время t – положительная величина).

Воспользуемся решением (13.26). Согласуем это решение с расчетной схемой рассматриваемой задачи (на рис. 13.8, b отдельно показан выделенный слой).

- Координаты x, y заменим на y, z . Соответственно квадрат плоского радиуса-вектора $r^2 = x^2 + y^2$ заменим на $r^2 = y^2 + z^2$.
- $Q = 2q \frac{dx}{v}$, где множитель 2 означает, что выделенный слой является полубесконечным, и по площади торца слоя ($dx y$) [см²] теплообмен с окружающей средой отсутствует (поверхность полубесконечного тела непроницаема для теплоты).
- Толщину пластины s заменим на толщину слоя dx .
- Коэффициент теплоотдачи с поверхностей слоев примем равным нулю: $b = \frac{2\alpha_l}{c\rho s} = 0$, так как слои в тепловом отношении изолированы друг от друга: $\alpha_l = 0$.

- Время t , как уже оговаривалось выше: $t = \frac{-x}{v}$.

После преобразований получаем решение задачи

$$T(r, t) = \frac{q}{2\pi\lambda vt} \exp\left[-\frac{r^2}{4at}\right], \quad (13.38)$$

где $r^2 = y^2 + z^2$ – квадрат плоского радиуса-вектора, характеризующего расстояние любой точки тела от оси перемещения источника.

2. Подвижный линейный источник в пластине.

Рассуждая аналогично, представим, что пластина толщиной s состоит из бесконечного количества узких полосок (стержней) сечением (dx) и ориентированных перпендикулярно оси перемещения линейного источника (рис. 13.9, a). Линейный источник, перемещаясь в пластине,

сообщает им мгновенные количества теплоты: $Q = qdt = q \frac{dx}{v}$, которые распространяются только в пределах выделенных полосок, так как по сделанному ранее допущению все полоски в тепловом отношении изолированы друг от друга: $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$. Таким образом, процесс распространения теплоты в каждой полоске идентичен действию мгновенного плоского источника в стержне, а отличается, как и в предыдущем случае, только началом действия мгновенного источника ($t = \frac{-x}{v}$ при $x = 0, t = 0$).

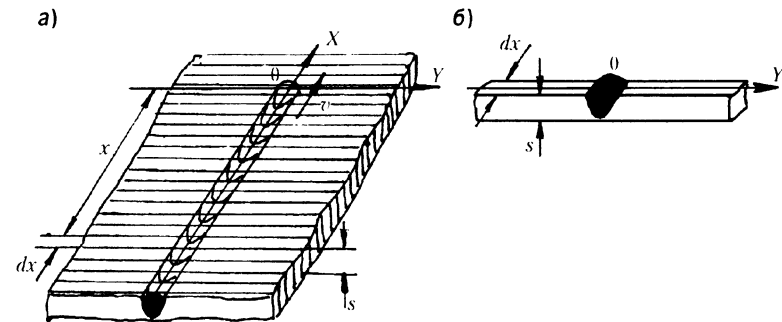


Рис. 13.9. Схема представления бесконечной пластины как пакета полосок шириной dx , в тепловом отношении изолированных друг от друга: a – схема пластины; b – расчетная схема бесконечного стержня сечением dx

Воспользуемся решением (13.29). Согласуем это решение с расчетной схемой рассматриваемой задачи на рис. 13.9, б отдельно показана выделенная полоска).

- Координату x заменим на y .
- $Q = q \frac{dx}{\tau}$.
- $F = dxs$.
- Теплообмен с окружающей средой поверхностей пластины учтем, оценив величину коэффициента теплоотдачи b_1 для стержня:

$$b_1 = \frac{\alpha_T P}{c\rho F} = \frac{\alpha_T 2dx}{c\rho dxs} = \frac{2\alpha_T}{c\rho s} = b,$$

где P – периметр теплоотдающей поверхности, в рассматриваемом случае $P = 2dx$; b – коэффициент теплоотдачи для пластины, в рассматриваемом случае $b = b_1$.

- Время t , как уже оговаривалось: $t = \frac{-x}{v}$.

После преобразований получаем решение задачи

$$T(y, t) = \frac{q}{\tau s \sqrt{4\pi\lambda c\rho t}} \exp\left[-\frac{y^2}{4at} - bt\right], \quad (13.39)$$

где y характеризует отстояние любой точки пластины от оси перемещения источника.

Анализируя полученные решения (13.38) и (13.39), видим, что, если требуется оценить температурное поле предельного состояния, то в эти решения вместо времени t следует подставить $\left(-\frac{x}{v}\right)$; ассоциация температурного поля предельного состояния при этом показана на рис. 13.10. В то же время решения в приведенном выше виде позволяют оценить температурные изменения любых конкретных точек тел, отстоящих от оси шва на расстояниях r или y , во времени.

В сварочной практике изменение температуры конкретной точки тела во времени при сварке называют *термическим циклом* (ТЦ) *этой точки*.

Полученные решения можно рекомендовать для непосредственных инженерных расчетов ТЦ точек в областях, близко расположенных к шву. Причем при сварке материалов с низкой теплопроводностью (стали всех

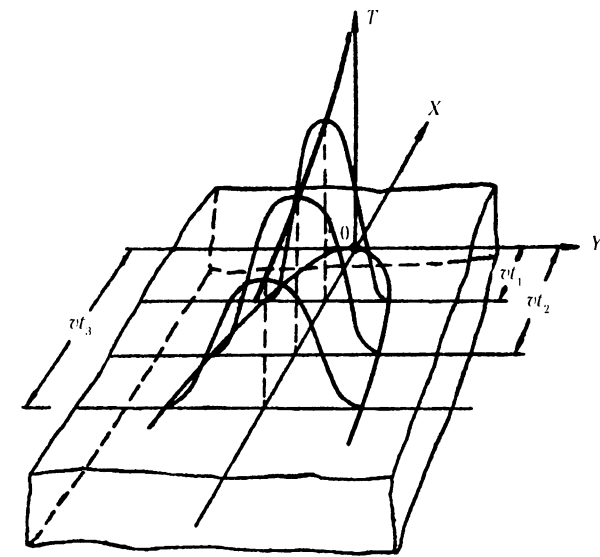


Рис. 13.10. Схема, иллюстрирующая температурное поле предельного состояния при нагреве мощным быстродвижущимся источником

классов, сплавы на основе никеля, титана и др.) – как при автоматической и полуавтоматической, так и при ручной электродуговой сварке; при сварке же металлов с высокой теплопроводностью (медь и сплавы на ее основе, алюминий и сплавы на его основе) – только при автоматической сварке (при достаточно высоких скоростях сварки).

13.7. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТОВ ПРИ СВАРКЕ

Расчеты температурных полей и ТЦ при электродуговой сварке не являются самоцелью, а позволяют находить в конкретных случаях рациональные технологические решения изготовления различных сварных конструкций. Эти расчеты обычно преследуют следующие цели.

1. Иметь полную информацию о температурном поле или ТЦ исследуемых точек. Например, при исследовании термомеханических процессов необходимо проследить всю историю теплового нагружения вплоть до полного охлаждения. Полученные решения позволяют оперативно получить эту информацию.
2. Оценить максимальные температуры T_{\max} , до которых в процессе

сварки нагревались исследуемые точки. Например, оперативно определить ширину околошовной зоны с изменившимися в процессе сварочного нагрева и охлаждения структурой и свойствами, оценить величину разупрочненной зоны при сварке термоупрочненных металлов, определить параметры зоны, требующей защиты от контакта с окружающей средой при сварке активных металлов, и многое другое.

3. Установить мгновенную скорость охлаждения исследуемых точек $W(T')$ при некоторой температуре T' . Например, при сварке металлов, склонных к закалке, величина скорости охлаждения металла при температуре начала распада аустенита определяет вероятность появления неравновесных структур (мартенсита).
4. Определить время выдержки t_n исследуемых точек при температуре выше критической температуры T'' . Например, величина зерна в зоне, прилегающей непосредственно к шву, зависит от времени нахождения ее в области температур выше температуры перегрева (для сталей $T'' \geq 1200$ °С).

На рис. 13.11 приведена схема простого ТЦ точки, где T_0 – начальная температура тела или температура предварительного подогрева.

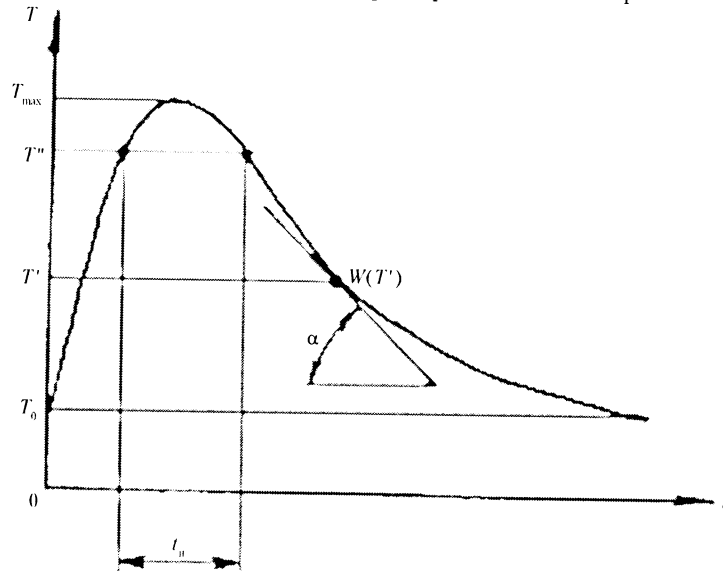


Рис. 13.11. Термический цикл точки:

T_0 – температура предварительного подогрева; T_{max} – максимальная температура;
 $W(T') = tg\alpha$ – мгновенная скорость охлаждения точки при температуре T' ;
 t_n – время выдержки точки при температуре выше температуры T''

Расчет максимальных температур

Наиболее просто выражения для оценки максимальных температур можно получить для расчетной схемы мощного быстродвижущегося источника.

1. Подвижный точечный источник на поверхности полубесконечного тела.

Воспользуемся решением (13.38). Возьмем частную производную по времени

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = -\frac{q}{2\pi\lambda\sqrt{t}} \exp\left[-\frac{r^2}{4at}\right] + \frac{q}{2\pi\lambda\sqrt{t}} \exp\left[-\frac{r^2}{4at}\right] \frac{r^2}{4at^2}.$$

Полученное выражение преобразуем к виду

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = \frac{T(r, t)}{t} \left(\frac{r^2}{4at} - 1 \right).$$

Приравняв полученное выражение нулю, находим время наступления максимальных температур. Случай, когда $T(r, t_{max}) = 0$ или $t_{max} \rightarrow \infty$, интереса не представляют: они отвечают конечным состояниям процесса, когда температура равна T_0 или полностью выравнилась. Остается только случай

$$\frac{r^2}{4at_{max}} - 1 = 0 \quad \text{или} \quad t_{max}(r) = \frac{r^2}{4a}.$$

Подставляя значение t_{max} в исходное уравнение (13.38), после преобразований получаем

$$T_{max}(r) = \frac{0,368q}{\frac{\pi}{2} \nu_{ср} r^2}, \quad (13.40)$$

где $0,368 = \exp[-1]$ – численный коэффициент.

2. Подвижный линейный источник в пластине.

Воспользуемся решением (13.39). Частная производная по времени

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(y, t)}{\partial t} &= -\frac{q}{\tau s \sqrt{4\pi\lambda c\rho}} \frac{1}{2t^{3/2}} \exp\left[-\frac{y^2}{4at} - bt\right] + \\ &+ \frac{q}{\tau s \sqrt{4\pi\lambda c\rho t}} \exp\left[-\frac{y^2}{4at} - bt\right] \left(\frac{y^2}{4at^2} - b\right) = \\ &= \frac{T(y, t)}{t} \left(-\frac{1}{2} + \frac{y^2}{4at} - bt\right). \end{aligned}$$

Приравнявая полученное выражение нулю, находим время наступления максимальных температур. Случаи, когда $T(y, t_{\max}) = 0$ или $t_{\max} \rightarrow \infty$, интереса не представляют. Также положим, что $bt_{\max} \ll \frac{1}{2}$ (такое предположение оправдано для точек, близких к оси перемещения источника, максимальные температуры которых теплоотдача не успевает существенно понизить):

$$-\frac{1}{2} + \frac{y^2}{4at_{\max}} = 0 \text{ или } t_{\max}(y) = \frac{y^2}{2a}.$$

Подставляя значение t_{\max} в исходное уравнение (13.39), после преобразований получаем

$$T_{\max}(y) = \frac{0,484q}{\tau s c\rho 2y} \left(1 - \frac{by^2}{2a}\right), \quad (13.41)$$

где $0,484 = \sqrt{\frac{2}{\pi e}}$ — численный коэффициент; $\left(1 - \frac{by^2}{2a}\right)$ — два первых члена быстросходящегося ряда функции $\exp\left[-\frac{by^2}{2a}\right]$: $\exp(-u) = 1 - u + \frac{u^2}{2!} - \frac{u^3}{3!} + \dots$

Расчет мгновенных скоростей охлаждения

Выкладки, ввиду полной однотипности рассуждений, приведем параллельно, как для подвижного точечного источника на поверхности

полубесконечного тела, так и для подвижного линейного источника в пластине. Воспользуемся решениями (13.38) и (13.39), в которых учтем начальную температуру тела T_0 , отличную от нулевой (предварительный подогрев тела):

$$T(r, t) = \frac{q}{2\pi\lambda\tau t} \exp\left[-\frac{r^2}{4at}\right] + T_0;$$

$$T(r, t) = \frac{q}{\tau s \sqrt{4\pi\lambda c\rho t}} \exp\left[-\frac{y^2}{4at} - bt\right] + T_0.$$

Заметим, что оценка скоростей охлаждения целесообразна только для узкой области (шов и околошовные зоны), нагреваемой в процессе сварки выше температуры A_3 (для малоуглеродистой стали $A_3 > 850^\circ\text{C}$). Температура же начала распада аустенита заведомо ниже температуры A_1 ($A_1 \sim 720^\circ\text{C}$). Поэтому ТЦ точек из этой высоконагреваемой области по ветвям охлаждения практически совпадают, т. е. охлаждаются с одинаковой скоростью. На этом основании можно положить, что скорости охлаждения точек из этой области равны скоростям охлаждения, рассчитанным для точек, лежащих на оси шва. Также можно пренебречь эффектом теплообмена с окружающей средой для пластины, так как время нахождения металла в области высоких температур незначительно. Положив $r = 0$, $y = 0$, $b = 0$, исходные формулы приведем к виду

$$T(0, t) - T_0 = \frac{q}{2\pi\lambda\tau t} \quad \Bigg| \quad T(0, t) - T_0 = \frac{q}{\tau s \sqrt{4\pi\lambda c\rho t}}. \quad (13.42)$$

Взяв производную по времени, получим зависимость мгновенных скоростей охлаждения от времени

$$\frac{dT(t)}{dt} = -\frac{q}{2\pi\lambda\tau t^2} \quad \Bigg| \quad \frac{dT(t)}{dt} = -\frac{q}{2\tau s \sqrt{4\pi\lambda c\rho} t^{3/2}}. \quad (13.43)$$

Определим время t из уравнений (13.42)

$$\frac{1}{t} = \frac{2\pi\lambda\tau(T - T_0)}{q} \quad \Bigg| \quad \frac{1}{\sqrt{t}} = \frac{\tau s \sqrt{4\pi\lambda c\rho}(T - T_0)}{q}.$$

Подставив значения $\frac{1}{l}$ и $\frac{1}{\sqrt{l}}$ в уравнения (13.43) и проведя соответствующие преобразования, получим формулы для оценки скоростей охлаждения $\frac{dT}{dt} = W(T)$ [°C/с].

Для полубесконечного тела

$$W(T) = -2\pi\lambda \frac{(T-T_0)^2}{\frac{q}{\tau}} \quad (13.44)$$

Для пластины

$$W(T) = -2\pi\lambda c\rho \frac{(T-T_0)^3}{\left(\frac{q}{\tau s}\right)^2} \quad (13.45)$$

Знак минус в формулах указывает, что происходит охлаждение.

Анализируя полученные решения, видим, что величина мгновенной скорости охлаждения при определенной температуре T зависит от:

- погонной энергии сварки $\frac{q}{\tau}$;
- температуры начального подогрева T_0 .

При этом следует отметить, что начальный подогрев является действенным фактором значительных изменений (уменьшений) скорости охлаждения металла шва и околошовных зон.

Оценка длительности нагрева выше определенной температуры

Длительность нагрева t_n выше определенной температуры наиболее просто определить непосредственно из кривых ТЦ исследуемых точек.

Рассмотрим несколько примеров.

Пример 1. Два листа низкоуглеродистой стали толщиной 10 мм свариваются встык односторонним однопроводным швом (на флюсовой подушке). Сварка автоматическая под флюсом на режиме $I = 800$ А, $U = 38$ В, $v = 30$ м/ч. Следует построить кривые максимальных температур в околошовных зонах и оценить ширину зоны, нагреваемую в процессе сварки выше 500 °С, т. е. определить ширину участка металла с изменившимися в результате сварочного нагрева структурой и свойствами.

Исходя из условий задачи назначаем расчетную схему: подвижный линейный источник в пластине. Воспользуемся решением (13.41), положив $b = 0$ (для листов толщиной более 6,0 мм эффект теплоотдачи незначителен):

$$T_{\max}(y) = \frac{0,484q}{\tau s c p 2y}$$

Эффективную тепловую мощность сварочной дуги определяем по выражению (13.2) и рекомендуемому значению η_n ($\eta_n = 0,8$ для автоматической сварки под флюсом):

$$q = \eta_n IU = 0,8 \cdot 800 \cdot 38 = 24320 \text{ Вт.}$$

Значения коэффициентов теплофизических свойств принимаем согласно табл. 13.2. Учитывая, что $v = 30$ м/ч = 0,83 см/с и принимая $c\rho = 4,3$ Дж/см³·°С, определим значения максимальных температур для точек, лежащих от оси шва с шагом 1 см:

$$T_{\max}(1) = T_{\max}(-1) = \frac{0,484 \cdot 24320}{0,83 \cdot 1 \cdot 4,3 \cdot 2 \cdot 1} = 1650 \text{ °С;}$$

$$T_{\max}(2) = T_{\max}(-2) = \frac{0,484 \cdot 24320}{0,83 \cdot 1 \cdot 4,3 \cdot 2 \cdot 2} = 825 \text{ °С;}$$

$$T_{\max}(3) = T_{\max}(-3) = \frac{0,484 \cdot 24320}{0,83 \cdot 1 \cdot 4,3 \cdot 2 \cdot 3} = 550 \text{ °С;}$$

$$T_{\max}(4) = T_{\max}(-4) = \frac{0,484 \cdot 24320}{0,83 \cdot 1 \cdot 4,3 \cdot 2 \cdot 4} = 412 \text{ °С;}$$

$$T_{\max}(5) = T_{\max}(-5) = \frac{0,484 \cdot 24320}{0,83 \cdot 1 \cdot 4,3 \cdot 2 \cdot 5} = 330 \text{ °С;}$$

$$T_{\max}(6) = T_{\max}(-6) = \frac{0,484 \cdot 24320}{0,83 \cdot 1 \cdot 4,3 \cdot 2 \cdot 6} = 275 \text{ °С.}$$

Из графика (рис. 13.12) ширина зоны (зона заштрихована) с изменившимися свойствами равна 6,9...7,1 см.

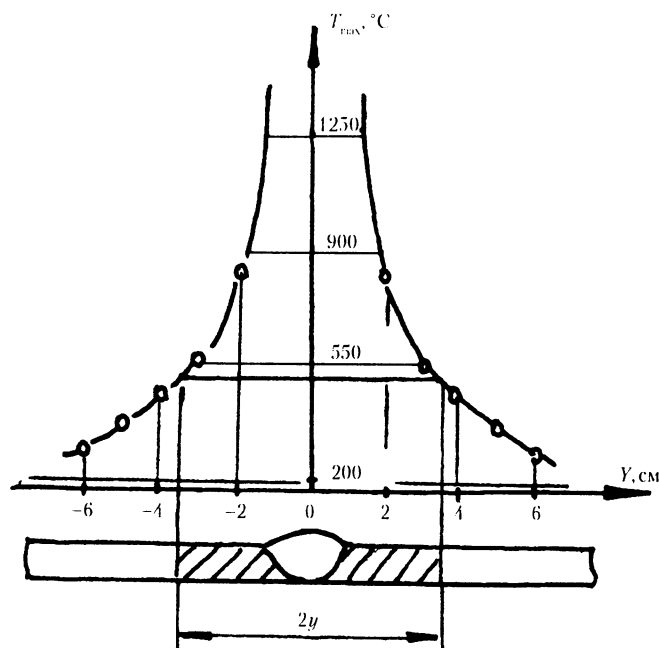


Рис. 13.12. Расчетные кривые максимальных температур к примеру 1

$$\text{Проверим: } 2y = \frac{0,484q}{\tau_{\text{иср}} T_{\text{max}}} = \frac{0,484 \cdot 24320}{0,83 \cdot 1 \cdot 4,3 \cdot 500} = 7 \text{ см.}$$

Пример 2. Требуется нанести на поверхность плиты из малоуглеродистой стали толщиной 50 мм облицовку с требуемыми рабочими свойствами, например с повышенной износостойкостью. Облицовка осуществляется одиночными длинными валиками автоматической наплавкой под флюсом на режиме $I = 420 \text{ А}$, $U = 36 \text{ В}$, $v = 18 \text{ м/ч}$. Сварочные материалы (соответствующая марка низколегированной проволоки и флюс) подобраны так, что наплавленный металл (смесь наплавляемого и расплавляемого основного металлов) обеспечивает служебные свойства при условии, что при охлаждении его при температуре $T = 400 \text{ °C}$ обеспечивается мгновенная скорость охлаждения в пределах $(8 \dots 10) \text{ °C/с}$. Проверить и, если потребуется, внести коррективы в технологию наплавки.

Исходя из условий задачи назначим расчетную схему: подвижный точечный источник на поверхности полубесконечного тела. Вос-

пользуемся решением (13.44) для оценки мгновенных скоростей охлаждения

$$W(T) = -2\pi\lambda \frac{(T - T_0)}{\frac{q}{\tau}}$$

По выражению (13.2) и рекомендуемому значению $\eta_{\text{н}}$ ($\eta_{\text{н}} = 0,8$) определим эффективную тепловую мощность дуги, значения теплофизических констант возьмем из табл. 13.2 ($\lambda = 0,4 \text{ Дж/см} \cdot \text{с} \cdot \text{°C}$) и учтем $v = 18 \text{ м/ч} = 0,5 \text{ см/с}$.

$$q = 0,8 \cdot 420 \cdot 36 = 12100 \text{ Вт.}$$

Определим $W(T)$, осуществляя наплавку в цехе, приняв $T_0 = 15 \text{ °C}$:

$$W(400) = -2 \cdot 3,14 \cdot 0,4 \frac{(400 - 15)^2 \cdot 0,5}{12100} = -15,4 \text{ °C/с.}$$

Полученная величина скорости охлаждения больше требуемой, поэтому вносим изменения в технологию наплавки: предварительно нагреем плиту до 50 °C ($T_0 = 50 \text{ °C}$), тогда

$$W(400) = -2 \cdot 3,14 \cdot 0,4 \frac{(400 - 50)^2 \cdot 0,5}{12100} = -12,7 \text{ °C/с.}$$

Скорость охлаждения уменьшилась, но все же выше требуемой, увеличим температуру начального подогрева ($T_0 = 100 \text{ °C}$):

$$W(400) = -2 \cdot 3,14 \cdot 0,4 \frac{(400 - 100)^2 \cdot 0,5}{12100} = -9,34 \text{ °C/с.}$$

Температура начального подогрева достаточна, чтобы скорость охлаждения была в пределах требуемой.

Обобщая полученные результаты, следует сказать: в технологию наплавки следует внести коррективы – требуется предварительный подогрев плиты до температур $(100 \dots 110) \text{ °C}$. Перед наплавкой очередного валика строго следить, чтобы начальная температура плиты была в этих пределах, если потребуется – дополнительно ее подогреть или охладить.

Пример 3. Качественно оценить параметры сварочной ванны при наплавке валика на толстый лист при увеличении скорости наплавки, эффективная тепловая мощность при этом не меняется.

По условию задачи назначаем расчетную схему: подвижный точечный источник на поверхности полубесконечного тела. Для рассуждений, так как величина скоростей не оговаривается, следует взять решение (13.35)

$$T(R, x) = \frac{q}{2\pi\lambda R} \exp\left[-\frac{\tau x}{2a} - \frac{\tau R}{2a}\right].$$

Оценим изменение длины сварочной ванны позади источника, т. е. примем $y = 0, z = 0, x$ – отрицательная координата.

Позади источника по отрицательной оси OX решение примет вид

$$T(-x) = \frac{q}{2\pi\lambda|x|}.$$

Видно, что распределение температуры позади источника по оси его движения не зависит от скорости движения, т. е. длина ванны жидкого металла позади источника $L_b(-x) = |x|$, ограниченной изотермической поверхностью ($T = T_{пл}$), остается постоянной и равной

$$L_b(-x) = \frac{q}{2\pi\lambda T_{пл}}.$$

Оценим изменение длины сварочной ванны впереди источника: $y = 0, z = 0, x$ – положительная величина:

$$T(+x) = \frac{q}{2\pi\lambda x} \exp\left[-\frac{\tau x}{a}\right].$$

Видно, что при увеличении скорости движения источника длина участка сварочной ванны станет меньше, так как впереди источника температура убывает более быстро при увеличении скорости (функция \exp в более отрицательной степени).

Оценим изменение ширины сварочной ванны, для простоты рассуждений возьмем сечение $x = 0$, тогда

$$T(y, z) = \frac{q}{2\pi\lambda\sqrt{y^2 + z^2}} \exp\left[-\frac{\tau\sqrt{y^2 + z^2}}{2a}\right].$$

Видно, что при увеличении скорости движения источника температура в направлениях от оси движения источника ($r = \sqrt{y^2 + z^2}$) убывает быстрее, то же имеет место и при любом x , т. е. ширина и глубина ванны жидкого металла будут меньше. Результаты рассуждений представлены на рис. 13.13.

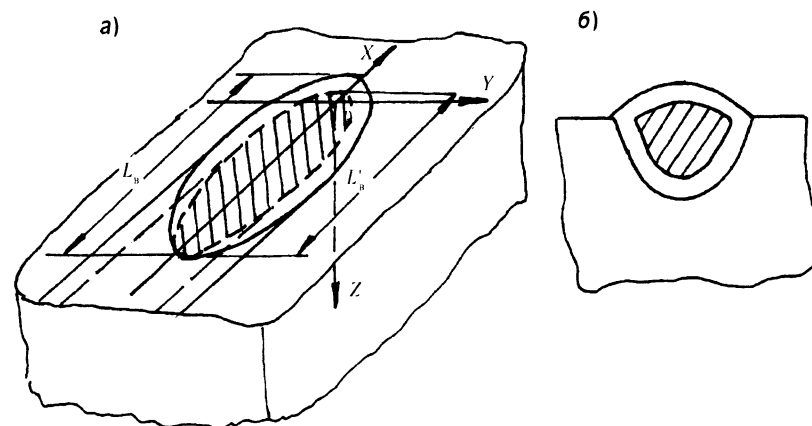


Рис. 13.13. Параметры сварочной ванны:

a – изменение параметров сварочной ванны при увеличении скорости наплавки:
 L_b и L'_b – длина сварочной ванны до и после увеличения скорости наплавки;
б – изменение очертаний валика (заштриховано сечение валика после увеличения скорости наплавки)

13.8. ВЛИЯНИЕ ОГРАНИЧЕННОСТИ ИЗДЕЛИЙ НА ПРОЦЕСС РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛОТЫ ПРИ СВАРКЕ

Размеры свариваемых изделий в действительности всегда ограничены. Чем меньше расстояние от источника теплоты до границы тела, тем больше влияние, оказываемое ограниченностью тела на процесс распространения теплоты. При обычно встречающихся на практике соотношениях коэффициента теплопроводности металла и коэффициента поверхностной теплоотдачи граничные плоскости тела можно в первом приближении считать не пропускающими теплоту. Поэтому учет ограниченности размеров тела повышает температуру в сравнении с вычисленной по схеме неограниченного тела.

Распространение теплоты в плоском слое. Если толщина листа (свариваемых элементов) мала, так что нельзя пренебречь ограничивающим

влиянием нижней плоскости листа, но не настолько, чтобы считать температуру равномерно распределенной по толщине, назначают для расчета схему подвижного точечного источника на поверхности плоского слоя толщиной s (рис. 13.14). Ограничивающие поверхности плоского слоя можно считать не пропускающими теплоту, это допущение было оговорено в подразд. 13.3.

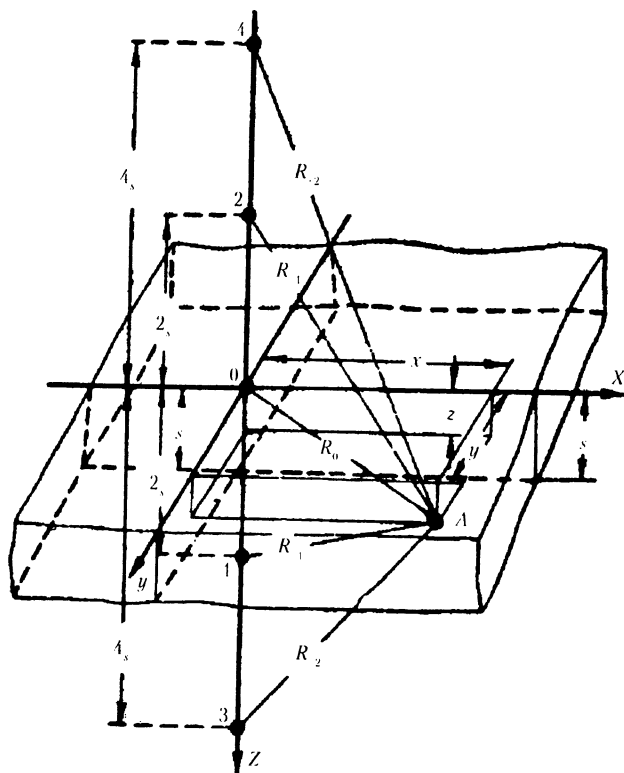


Рис. 13.14. Схема расположения фиктивных источников 1, 2, 3, 4... попеременно отражающих тепловой поток основного источника в непроницающих теплоту граничных плоскостях $z = 0$; $z = s$

Процесс распространения теплоты от подвижного точечного источника мощностью q на поверхности плоского слоя будем рассматривать, как часть процесса распространения теплоты от того же источника в неограниченном теле. Для этого удвоим мощность основного

источника и введем в тело дополнительные фиктивные источники 1, 2, 3... мощностью $2q$, являющиеся попеременными отражениями основного источника, находящегося в точке 0, в обеих, не пропускающих теплоту, ограничивающих плоскостях $z = 0$ и $z = s$. Так, например, источник 1 является отражением основного источника в нижней ограничивающей плоскости $z = s$, источник 2 – отражением источника 1 в верхней плоскости $z = 0$, источник 3 – отражением источника 2 в нижней плоскости $z = s$ и т. д.

Таким образом, процесс распространения теплоты подвижного точечного источника на поверхности плоского слоя описывается уравнением

$$T(x, y, z, t) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} T(R_n, t), \quad (13.46)$$

где $R_n^2 = x^2 + y^2 + (z - 2ns)^2$.

Уравнение (13.46) представляет сумму процессов распространения теплоты бесконечного ряда точечных источников мощностью $2q$ с координатами $(0, 0, 2ns)$, где n принимает все целые значения от $-\infty$ до $+\infty$, включая нуль. В качестве основной расчетной формулы в уравнении (13.46) рекомендуется брать решение (13.35).

Замечание: определение мгновенной скорости охлаждения в плоском слое рекомендуется выполнять по графику, предложенному Н. Н. Рыкалиным (рис. 13.15). Расчет выполняют в следующей последовательности: вычисляют безразмерный критерий $\frac{1}{\theta}$:

$$\frac{1}{\theta} = \frac{q}{\frac{\pi}{2} v s^2 c_p (T - T_0)}$$

Затем по предложенному графику определяют соответствующее ему значение критерия ω , по которому определяют мгновенную скорость охлаждения

$$W(T) = -\omega 2\pi\lambda \frac{(T - T_0)^2}{q} \quad (13.47)$$

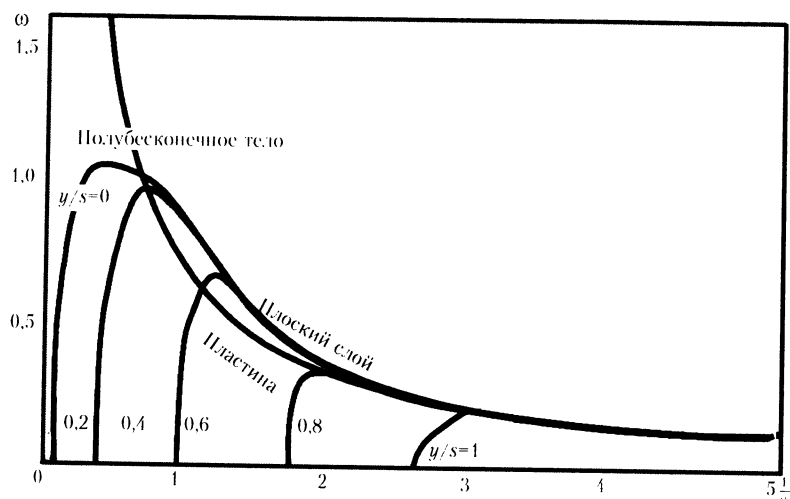


Рис. 13.15. График для определения мгновенной скорости охлаждения при наплавке валика на лист произвольной толщины s

Скорости охлаждения $W(T)$ точек плоского слоя, находящихся вне оси перемещения источника ($\frac{y}{s} \neq 0$) (см. рис. 13.15), возрастают от $W = 0$ (нулевая скорость охлаждения соответствует достижению максимальных температур точек y), достигают максимума и сливаются со скоростями охлаждения точек на оси шва ($\frac{y}{s} = 0$).

Влияние ограниченности размеров изделий по ширине и длине. Это влияние на процесс распространения теплоты при сварке можно учесть так же, как и при влиянии ограниченности изделий по толщине (плоский слой), введением дополнительных фиктивных источников, представляющих отражения основного источника в ограничивающих плоскостях, которые предполагаются не пропускающими теплоту. Таким образом можно рассчитать температурные поля при сварке полос различной ширины и длины. На рис. 13.16 иллюстративно показан учет ограниченности изделий по ширине на процесс распространения теплоты (сварка узких полос различной ширины).

Наличие непроницаемых для теплоты граничных плоскостей стесняет поток теплоты, распространяющийся от источника, и повышает температуру тем больше, чем значительно стеснен тепловой поток.

В заключение раздела следует отметить:

- вопросы распространения теплоты при сварке, носящие, скорее, рекомендательный характер, например в случаях выполнения многопроходных швов, короткими или длинными участками и др., вынесены в соответствующие технологические разделы настоящего учебника;
- некоторые из расчетных методов, имеющих специфическое применение: нагрев распределенными источниками сварочного нагрева (газовое пламя), нагрев при других процессах сварки (контактная, электронно-лучевая, лазерная, электрошлаковая и др.), нагрев и плавление основного и присадочного металлов при электродуговой сварке и др. – в учебнике не рассматриваются;
- в то же время заложенная в данном разделе теоретическая база является основой тепловых расчетов перечисленных выше случаев и процессов.

14. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ И ДЕФОРМАЦИЯХ

14.1. ТЕОРИЯ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ И ЕЕ ЗНАЧЕНИЕ

Специфичный, высокотемпературный, локальный нагрев элементов конструкций при сварке, характеризующийся значительными градиентами температур, вызывает появление в них температурных деформаций и соответственно напряжений. В процессе сварочного нагрева и последующего охлаждения в металле происходит непрерывное изменение температурных деформаций и напряжений, причем в отдельных зонах сварного соединения возможно развитие необратимых объемных изменений, которые и будут являться причиной возникновения после-сварочных, так называемых остаточных, напряжений. Эти остаточные напряжения, в свою очередь, могут являться причиной снижения эксплуатационной прочности сварных конструкций и вызывать геометрические искажения последних, что может привести к ухудшению тактико-технических данных и, что очень важно в инженерной практике, товарного вида современных сварных конструкций. Поэтому изучение физической сущности развития и образования сварочных деформаций и напряжений с возможной количественной оценкой этих процессов имеет существенное значение для развития и совершенствования сварочного производства.

Уже в 30-е годы прошлого столетия, т. е. с начала широкого применения электродуговой сварки для изготовления сварных конструкций, трудами российских ученых В. П. Вологодина, Г. А. Николаева, Н. О. Окерблома были заложены основы теории сварочных деформаций и напряжений. В последующие годы благодаря российским исследователям эта теория получила широкое развитие. Позднее сформировались два научных направления: первое – развитие и совершенствование инженерных методов (С. А. Кузьминов, К. М. Гатовский и многие другие); второе – разработка теории сварочных деформаций и напряжений на базе теории термопластичности с использованием ЭВМ и последних достижений вычислительной техники (В. И. Махненко, его ученики и другие).

Основное внимание в настоящем учебнике уделено инженерному методу, методически разработанному К. М. Гатовским. Этот метод позволяет достаточно просто и наглядно понять физическую сущность развития термомодеформационных процессов, происходящих в металле

сварных соединений в результате сварочного нагрева и охлаждения. В него закладывается ряд допущений и предпосылок, вполне оправданных в инженерной практике. Большое внимание уделяется и возможной приближенной количественной оценке геометрических искажений сварных конструкций разной сложности (решение конкретных задач). Рассматриваются вопросы по предотвращению и уменьшению сварочных деформаций и напряжений, рациональной технологии изготовления сварных соединений и конструкций, позволяющие улучшить товарный вид конструкций и тем самым в большинстве случаев повысить их эксплуатационные качества.

14.2. ПРИЧИНЫ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ ПОЯВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКЕ

Главной причиной, вызывающей появление деформаций и напряжений при электродуговой сварке, является локальный высокотемпературный нагрев металла соединяемых элементов мощным источником теплоты (сварочной дугой), характеризующийся резкой неравномерностью нагрева.

Представим, что тело составлено из большого количества малых кубических элементов одинаковых размеров. При равномерном повышении температуры тела каждый элемент будет расширяться на одну и ту же величину, пропорциональную повышению температуры, равномерно во всех направлениях. Таким образом, элементы будут оставаться кубиками одинаковых размеров, при этом никаких напряжений не возникнет. В случае, если повышение температуры в теле неравномерно, то каждый элементарный кубик стремится расшириться на величину, пропорциональную повышению его температуры: для соседних кубиков эта величина различна. Поскольку тело должно оставаться сплошным, менее нагретый кубический элемент будет ограничивать свободное расширение соседнего, более нагретого кубика, что сопровождается возникновением силовой ситуации между ними, т. е. появлением напряжений. Таким образом, в теле возникает сложное напряженное состояние. Если неравномерное нагружение кубиков по всему телу происходит только в упругой области, то после полного охлаждения каждый кубический элемент восстанавливает свои первоначальные размеры, и в теле исчезает напряженное состояние.

Если же в процессе нагрева в отдельном кубике или группах кубиков возникнут объемные изменения, обусловленные пластическим

деформированием металла, то после полного охлаждения он или они стремятся изменить свои размеры на величину возникших в них при нагреве пластических деформаций, что будет являться причиной появления остаточных напряжений, которые остаются в теле после полного охлаждения. Аналогичное объемное изменение в группах кубиков может быть и результатом происходящих в них структурных превращений: изменением объема металла при полиморфных превращениях, связанных с переупаковкой атомов, или образованием вынужденных пересыщенных твердых растворов, например мартенсита.

Таким образом, неравномерный нагрев тела и местные необратимые объемные изменения, обусловленные пластической деформацией или структурными превращениями, являются причиной появления соответственно температурных напряжений; напряжений, обусловленных пластическими деформациями; напряжений вследствие структурных превращений.

Обобщая сказанное, можно отметить, что при электродуговой сварке неравномерный нагрев всегда приводит к пластическому деформированию металла (ниже смотри пример), поэтому первые два вида напряжений неизбежны при сварке всех металлов, в то время как напряжения, обусловленные структурными превращениями, образуются при сварке только таких металлов, превращения в которых происходят при относительно низких температурах, когда металл уже восстановил свои упругие свойства, например в сталях мартенситного класса, в сталях перлитного класса, склонных к закалке, и др. Для малоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей этими напряжениями можно пренебречь.

Пример. Стержень из малоуглеродистой стали длиной l , жестко закрепленный по торцам, нагревается равномерно по всей длине. При какой температуре T напряжения в нем достигнут значений предела текучести стали σ_s ?

Потребные для расчета теплофизические константы и механические свойства для малоуглеродистой стали (по справочным данным):

- коэффициент теплового расширения (сжатия) $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$;
- предел текучести $\sigma_s = 240 \text{ МПа}$;
- модуль нормальной упругости $E = 20 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Если бы стержень длиной l был свободен, то при нагреве до температуры T он увеличил бы свою длину на

$$\Delta l^T = \alpha T l.$$

Но так как стержень закреплен, т. е. свободное его удлинение запрещено, то при нагреве в нем возникнут напряжения сжатия. Относительная деформация сжатия, возникающая в стержне при нагреве:

$$\varepsilon(T) = -\frac{\alpha T l}{l} = -\alpha T.$$

Согласно закону Гука, при одномерном сжатии деформации и напряжения связаны между собой соотношением

$$\sigma = \varepsilon E.$$

В рассматриваемой задаче это соотношение имеет вид

$$\sigma(T) = \varepsilon(T) E = -\alpha T E.$$

Разрешим это выражение относительно T , когда $\sigma(T) = \sigma_s$:

$$T = \frac{\sigma_s}{\alpha E} = \frac{|-240|}{12 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5} = 100 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (14.1)$$

Анализируя полученный результат, можно сделать правомерный вывод: пластическое деформирование при сварке в металле шва и достаточно широких околошовных зонах неизбежно.

14.3. КЛАССИФИКАЦИЯ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ

Напряжения будем обозначать общепринятым символом σ [МПа].

Напряжения, возникающие в металле при сварке, относятся к собственным напряжениям. Собственными напряжениями называются напряжения, присутствующие в конструкции при отсутствии внешних нагрузок. Обычно эти напряжения возникают в различных изделиях при их изготовлении, например при резании, шлифовании, гибке и различных других способах металлообработки; при сборке элементов конструкций в болтовых и заклепочных соединениях (в стержне болта или заклепки возникает растяжение, а в прилегающей зоне соединяемых элементов – сжатие) и во многих других случаях.

Собственные напряжения делят на макро- и микронапряжения. Их различие заключается в величинах градиентов напряжений. Если в пределах большого объема металла не наблюдаются участки малой

протяженности, например на уровне размеров зерна металла, с резкими изменениями напряжений, то такие напряжения могут быть отнесены к числу макронапряжений или собственных напряжений первого рода. Эти напряжения обычно имеют определенную ориентацию и уравновешены в пределах значительной части или всей конструкции в целом. Для таких напряжений вполне допустимо представление об изотропном материале. Микронапряжения, или собственные напряжения второго рода, претерпевают резкие изменения в пределах малых зон, например в пределах зерна металла – они связаны с анизотропией зерен.

Основной интерес в инженерной теории сварочных напряжений и деформаций представляет уровень и распределение макронапряжений в пределах всей конструкции, т. е. сварочные напряжения, рассматриваемые в данном учебнике, относим к собственным напряжениям первого рода.

В зависимости от мерности тел собственные напряжения могут быть одноосными, двухосными и трехосными. Так как эти напряжения присутствуют в теле при отсутствии внешних нагрузок, они должны быть взаимноуравновешены, т. е. в пределах любого сечения, пересекающего все тело, они всегда уравновешены по сумме сил и моментов сил, в частности, в любой плоскости, перпендикулярной к оси X , соблюдаются равенства

$$\int_F \sigma_X dF = 0; \int_F \sigma_X y dF = 0; \int_F \sigma_X z dF = 0, \quad (14.2)$$

где σ_X – нормальные напряжения в точке с координатами y, z в выделенном сечении и площадью F , а координатные оси Y и Z расположены в плоскости этого сечения.

Из условия (14.2) следует, что собственные напряжения двузначны: растягивающие напряжения – положительны, сжимающие – отрицательны.

Сварочные напряжения дополнительно классифицируют по следующим признакам.

По времени действия:

- временные сварочные напряжения, существующие в металле в процессе сварочного нагрева и охлаждения;
- остаточные сварочные напряжения, остающиеся в металле после полного охлаждения конструкции.

По направлению действия:

- продольные напряжения, направленные параллельно оси шва, их обозначают σ_x . Здесь индекс x означает, что в местной системе координат x, y, z ось $0x$ совпадает с осью шва, оси $0y$ и $0z$ ориентированы перпендикулярно к оси шва. Следует заметить, что местная система координат x, y, z , связанная со швом, в дальнейшем при рассмотрении конкретных примеров может не совпадать с общей системой координат X, Y, Z , связанной с телом или конструкцией;
- поперечные напряжения, направленные перпендикулярно к оси шва, их обозначают σ_y (при сварке плоских элементов конструкции обозначение σ_z отсутствует).

По причине, вызывающей появление напряжений:

- температурные напряжения, обусловленные неравномерным нагревом металла;
- напряжения, обусловленные пластическим деформированием металла;
- напряжения, обусловленные структурными (полиморфными или вынужденными) превращениями.

По характеру действия:

- активные напряжения (их удаление приводит к полному освобождению конструкции от напряжений);
- уравнивающие напряжения;
- реактивные напряжения, обусловленные наличием внешних связей, когда конструкция сваривается, например, в закреплении, препятствующем перемещению ее отдельных точек.

Переходя к классификации сварочных деформаций, необходимо отметить, что под этим широким и многозначным термином понимают не только относительные удлинения в окрестностях рассматриваемой точки (относительную деформацию будем обозначать общепринятым символом ϵ ; это безразмерная величина или выражается в процентах), но и прогибы, углы поворота, изменения линейных размеров изделия (стрелка прогиба f [см]; угол поворота φ [рад]; изменение линейного размера ΔL [см] соответственно).

Как и напряжения, сварочные деформации могут быть временными и остаточными, продольными и поперечными.... но в свою очередь сварочные деформации следует разделить на две группы в зависимости от того, на какую часть конструкции они распространяются:

- деформации, вызывающие геометрическое искажение всего изделия или конструкции, получили название *общих сварочных де-*

формаций (рис. 14.1). К ним относят изменение линейных размеров конструкции и искривление ее осей в продольном и поперечном направлениях;

- деформации, распространяющиеся только на отдельные элементы конструкции, получили название *местных сварочных деформаций* (рис. 14.2). К ним относят местные геометрические искажения изделия или конструкции: грибовидность, коробление, ребристость и др.

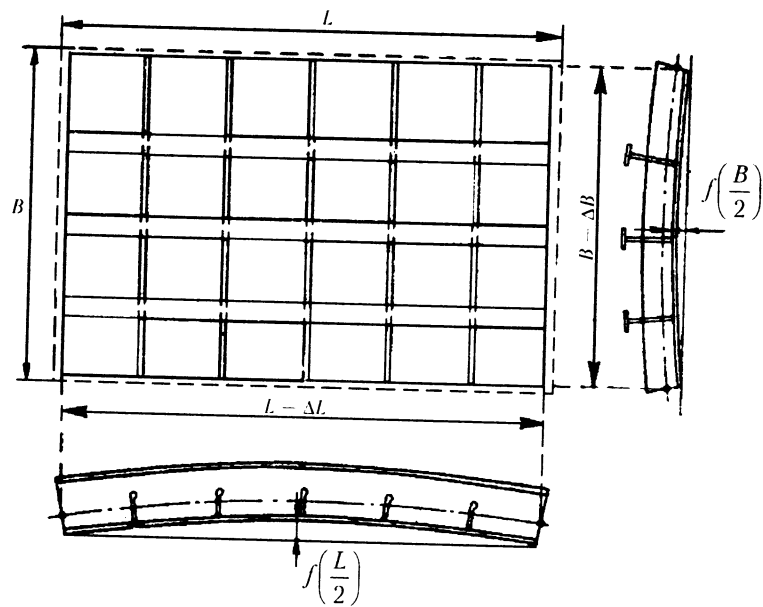


Рис. 14.1. Общие сварочные деформации плоскостной секции:

$\Delta L, \Delta B$ – продольное и поперечное укорочение соответственно;
 $f(\frac{L}{2}), f(\frac{B}{2})$ – стрелки прогибов в продольном и поперечном направлениях

В практике изготовления сварных конструкций имеет место проявление как общих, так и местных сварочных деформаций. Они не только понижают работоспособность конструкций, но и ухудшают их внешний вид. Следует также отметить, что местные деформации влияют

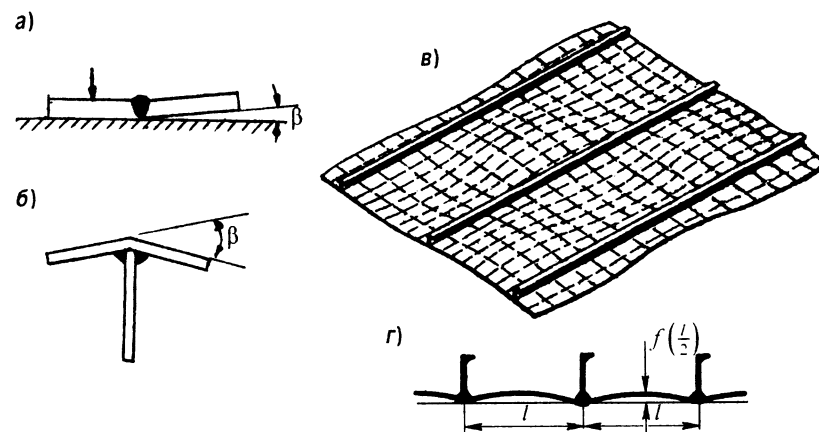


Рис. 14.2. Разновидности местных сварочных деформаций:

- а – угловая деформация при сварке листов встык;
- б – угловая деформация полки тавра (грибовидность);
- в – местные деформации полотноца от приварки к нему ребер жесткости (выпучивание, коробление);
- г – местные деформации полотноца (ребристость)

на общие, но это влияние относят к вторичным эффектам и не учитывают.

15. ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ В БАЛКАХ ПРИ ТЕПЛОМ НАГРУЖЕНИИ

15.1. ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ ПРИ НАГРЕВЕ

Как уже отмечалось, процесс электродуговой сварки связан с высокотемпературным локальным нагревом. Диапазон температур для металлов шва и околошовных зон значительный – от отрицательных температур, например «при сварке на морозе», до температур, превышающих температуру плавления металла. Известно, что в таком широком интервале температур существенно изменяются теплофизические и механические свойства металлов. В то же время для качественной и количественной оценки деформаций и напряжений, возникающих при сварке, необходимо располагать экспериментальными данными о характере изменения указанных свойств металлов в большом интервале температур.

Из теплофизических свойств металлов важными являются те, которые определяют объемные изменения металлов при нагреве. К ним относятся коэффициент линейного теплового расширения (сжатия) α [1/°C] и объемная теплоемкость c_p [Дж/см³·°C].

Если в кубик, длина ребер которого равна a , ввести некоторое количество теплоты Q , то температура кубика повысится на величину T [согласно формуле (13.5)]:

$$T = \frac{Q}{c_p a^3}. \quad (15.1)$$

Повышение температуры кубика приведет к увеличению длины его ребер и соответственно объема. Длина ребер кубика после нагрева $a^T = a(1 + \alpha T)$, а объем

$$V^T = (a^T)^3 = a^3(1 + \alpha T)^3 = a^3[1 + 3\alpha T + 3(\alpha T)^2 + (\alpha T)^3].$$

Поскольку величина коэффициента теплового расширения для металлов порядка $10^{-5} \dots 10^{-3}$ 1/°C, можно пренебречь слагаемыми, содержащими α в степени выше первой, как членами более высокого порядка малости:

$$V^T = a^3(1 + 3\alpha T).$$

Отсюда увеличение объема кубика при нагреве

$$\Delta V^T = V^T - V = 3\alpha T a^3.$$

Подставляя вместо T ее значение из (15.1), получим

$$\Delta V^T = 3 \frac{\alpha}{c_p} Q.$$

Следовательно, относительное изменение объема кубика при его нагреве

$$\frac{\Delta V^T}{V} = 3 \frac{\alpha}{c_p} \frac{Q}{a^3}. \quad (15.2)$$

Таким образом, объемные изменения в металле при нагреве пропорциональны удельному тепловложению $\frac{Q}{a^3}$ [Дж/см³], а коэффициентом пропорциональности является обобщенная характеристика теплофизических свойств металла $\frac{\alpha}{c_p}$ [см³/Дж].

На рис. 15.1 представлены зависимости $\frac{\alpha}{c_p}$ от температуры для некоторых материалов (значения α , c и ρ как функции температуры взяты из соответствующих справочников). Анализируя эти зависимости, видим, что обобщенная характеристика в широком диапазоне температур для многих материалов изменяется незначительно и может быть принята постоянной величиной, например, для малоуглеродистых и низколегированных сталей $\frac{\alpha}{c_p} = 3,5 \cdot 10^{-6}$ см³/Дж.

Из механических свойств металлов важными являются предел текучести σ_s [МПа] и модуль нормальной упругости E [МПа]. На рис. 15.2, a представлена общеизвестная из сопротивления материалов диаграмма растяжения образца из малоуглеродистой или низколегированной стали (диаграмма σ - ϵ). На диаграмме наблюдается ярко выраженная площадка текучести, кроме того, известно, что для этих сталей кривые деформирования при растяжении и сжатии имеют одинаковый вид, и их можно с достаточной для инженерной практики точностью идеализировать диаграммой Прандтля, т. е. считать малоуглеродистые и низколегированные конструкционные стали идеально упругопластическими материалами. Для этих сталей по

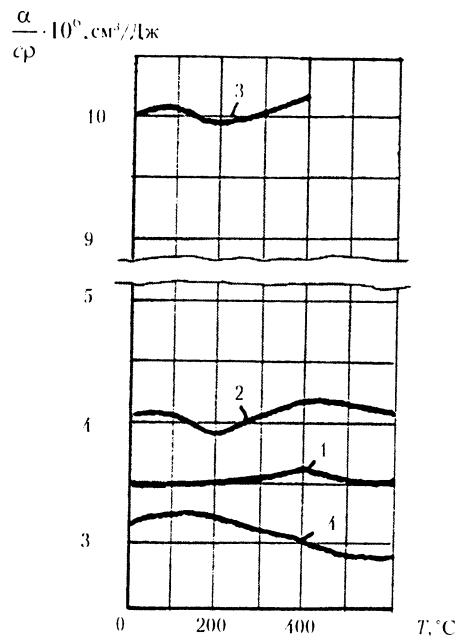


Рис. 15.1. Зависимость обобщенной характеристики теплофизических свойств материалов $\frac{\alpha}{\rho}$ от температуры:

- 1 – малоуглеродистые и низколегированные стали;
- 2 – высоколегированная сталь ОХ18Н10Т;
- 3 – алюминий-магний-сплав АМг-6;
- 4 – титановый сплав ВТ-5

экспериментальным данным общая тенденция изменения предела текучести σ_s и модуля нормальной упругости E от температуры представлена на рис. 15.2, б. Анализируя кривые изменения σ_s и E от температуры, следует отметить, что предел текучести σ_s с повышением температуры до 500 °С снижается очень медленно, а при температурах выше 600 °С значения σ_s очень малы. Снижение модуля нормальной упругости E с повышением температуры еще менее резкое, а при температурах выше 600 °С эта величина теряет физический смысл. На основании этого анализа можно допустить:

– при температурах $T < T^*$ (рис. 15.3, а)

$$\begin{aligned}\sigma_s(T) &= \sigma_s; \\ E(T) &= E;\end{aligned}$$

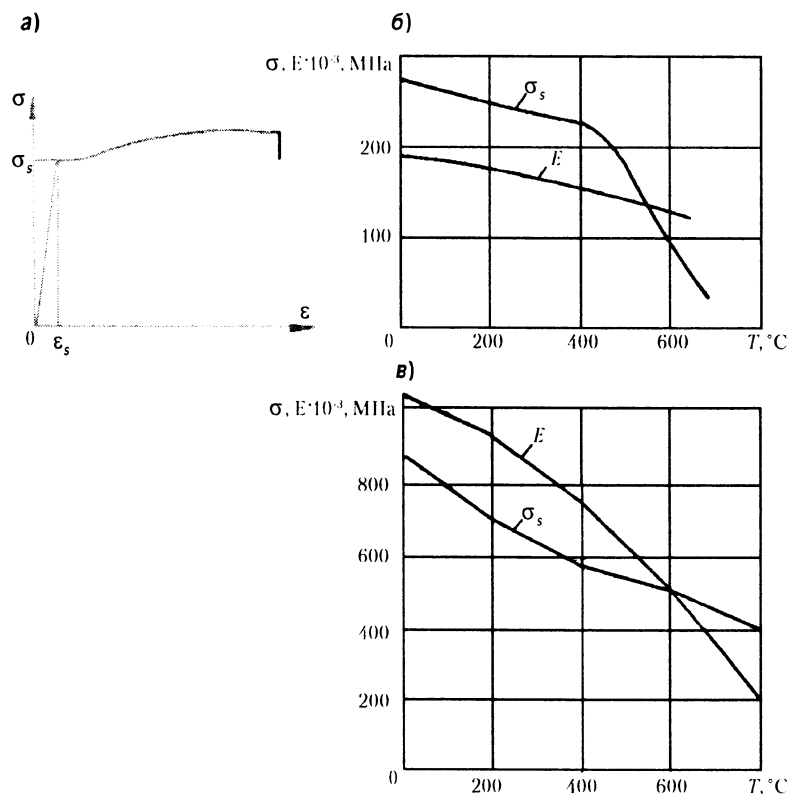


Рис. 15.2. Изменение механических свойств металлов при нагреве:

- а – диаграмма растяжения (σ - ϵ), характерная для малоуглеродистых и низколегированных сталей;
- б – изменение предела текучести σ_s и модуля нормальной упругости E от температуры для малоуглеродистых и низколегированных сталей;
- в – то же для титановых сплавов

– при температурах $T \geq T^*$ (рис. 15.3, б)

$$\sigma_s(T) = 0,$$

где T^* – температура, при которой металл теряет упругие свойства (температура полного разупрочнения металла). Для малоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей эта температура условно принята 600 °С.

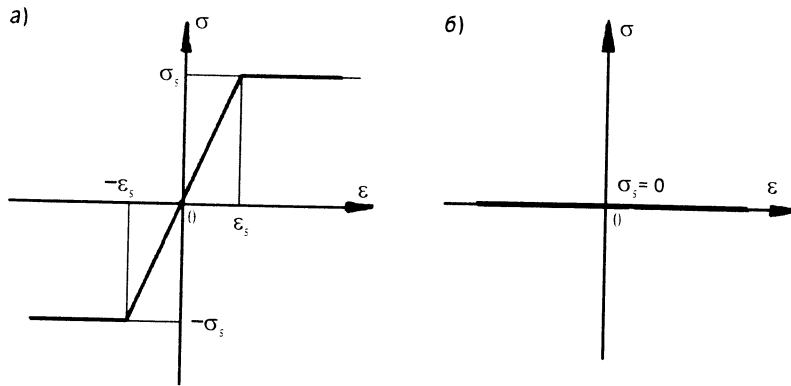


Рис. 15.3. Схематизированные диаграммы растяжения-сжатия (σ - ϵ) для идеальных упругоэластических металлов (диаграммы Прандтля):
 а - при температурах $T < T^*$; б - при температурах $T \geq T^*$

Подобная идеализация неприемлема, например, для титанового сплава BT-5 (рис. 15.2, в).

Указанная выше идеализация свойств металла значительно упрощает рассмотрение процесса образования деформаций и напряжений и выполнение требуемых расчетов. Вместе с тем она обеспечивает достаточную для практических целей точность при рассмотрении деформаций и напряжений, возникающих при сварке малоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей.

Примечание: введем понятие *действительной* или *полной деформации*. Эта деформация определяет действительное положение нагружаемой точки, например точки А на диаграмме σ - ϵ :

- если металл работает в упругой области (рис. 15.4, а), то имеет место однозначная зависимость между деформациями и напряжениями: $\sigma = \epsilon E$; в этом случае действительная деформация ϵ (положение точки А на диаграмме σ - ϵ) равна упругой ϵ^e :

$$\epsilon = \epsilon^e = \frac{\sigma_A}{E}; \quad (15.3)$$

- если металл работает в упругопластической области (рис. 15.4, б), то уже нет однозначной зависимости между деформациями и напряжениями, в этом случае действительная деформация ϵ (положение точки А на диаграмме σ - ϵ) равна сумме упругой ϵ^e и пластической ϵ^p деформаций:

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p = \frac{\sigma_A}{E} + \epsilon^p; \quad (15.4)$$

- если металл работает в упругопластической области и подвержен тепловому нагружению, то действительная деформация ϵ будет равна сумме упругой, пластической и температурной деформаций:

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p + \epsilon^T = \frac{\sigma}{E} + \epsilon^p + \epsilon^T, \quad (15.5)$$

где $\epsilon^T = \alpha T$.

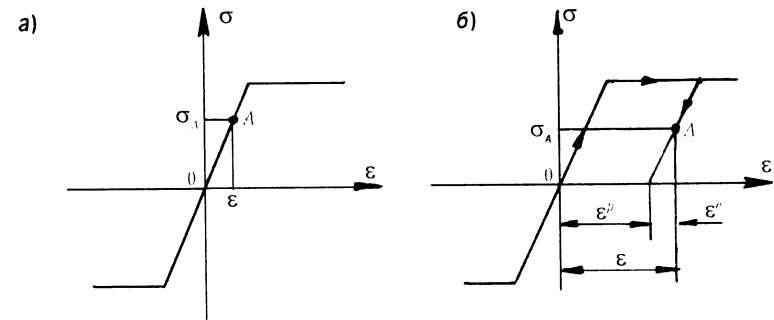


Рис. 15.4. Зависимость между деформациями и напряжениями:
 а - металл работает в упругой области;
 б - металл работает в упругопластической области

Введение понятия действительной или полной деформации будет востребовано для оценки действительного состояния при сложном нагружении и потребуется при рассмотрении истории теплового нагружения металла при сварке.

15.2. ДЕФОРМАЦИИ, НАПРЯЖЕНИЯ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В НЕРАВНОМЕРНО НАГРЕТОЙ БАЛКЕ

Рассмотрим балку простейшего сечения (прямоугольник) с прямой осью, и в центре тяжести ее левого торца поместим начало системы координат XYZ , направив ось X вдоль ее длины, оси Y и Z - вдоль главных осей поперечного сечения балки (рис. 15.5, а).

Выделим на некотором расстоянии x от начала координат два бесконечно близких сечениями aa и bb , перпендикулярными к оси OX , участок балки dx , отнесем его к единице длины и изобразим в несколько увеличенном виде (рис. 15.5, б, в). Предположим теперь, что балка подвержена внешнему нагружению (центральной продольной силой N и изгибающими моментами в плоскостях XOZ и XOY M_z и M_y соответственно) и неравномерно нагрета как по длине, так и по поперечному сечению (причем значения температур и их распределение не оговариваются).

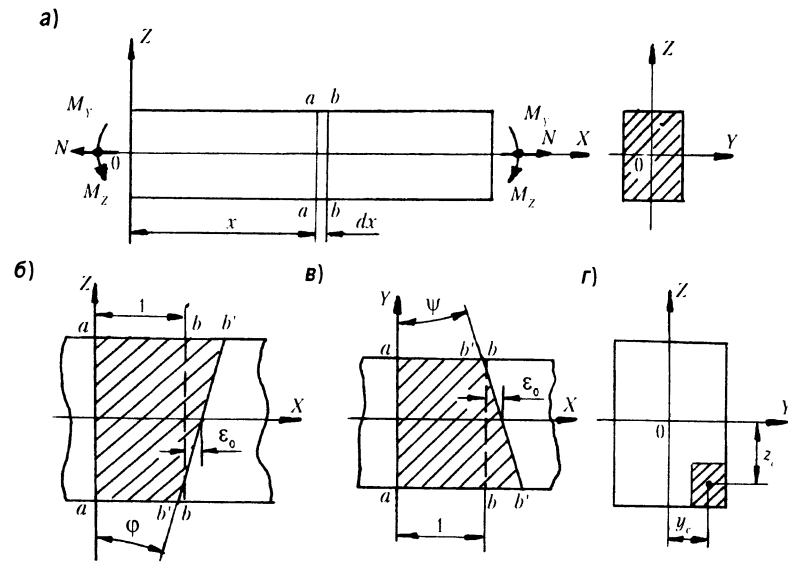


Рис. 15.5. Деформации балки в сечении x в результате внешнего и теплового нагружений:

a – общая схема нагружения; б, в – деформации участка балки единичной длины; ϵ_0 – смещение сечения bb по центральной оси; φ и ψ – углы поворота сечения bb относительно осей OY и OZ ; $z - y_c$ и x_c – координаты центра тяжести зоны остаточных пластических деформаций

Соответственно в выделенном участке балки в результате внешнего и теплового нагружения каждое продольное волокно будет стремиться удлинить (или укоротить) на величину, обусловленную этим на-

гружением. Это удлинение (укорочение) волокна может быть реализовано полностью, частично или вообще не реализовано по причине, что это удлинение (укорочение) ограничено смещенным сечением $b'b'$ (см. рис. 15.5, б, в), которое, согласно гипотезе плоских сечений, правомерной для балок, всегда при деформировании балок остается плоским. Таким образом, согласно выражению (15.5), действительная относительная продольная деформация каждого волокна в сечении балки $\epsilon(y, z)^*$, ограниченная смещенным, но плоским сечением, будет являться суммой упругой $\epsilon^e = \frac{\sigma(y, z)}{E}$, температурной $\epsilon^T(y, z)$ и пластической $\epsilon^P(y, z)$ деформаций:

$$\epsilon(y, z) = \frac{\sigma(y, z)}{E} + \epsilon^T(y, z) + \epsilon^P(y, z). \quad (15.6)$$

Заметим, что выражение (15.6) является уравнением смещенного плоского сечения.

С другой стороны, как видно из рис. 15.4, б, в, геометрически уравнением этого смещенного сечения является известное выражение

$$\epsilon(y, z) = \epsilon_0 + c_y z + c_z y, \quad (15.7)$$

где ϵ_0 – продольная относительная деформация по нейтральной оси; $c_y = \text{tg } \varphi$ – кривизна оси единичной длины балки относительно оси Y ; $c_z = \text{tg } \psi$ – кривизна оси единичной длины балки относительно оси Z .

Значение кривизны c_y или c_z принимается положительным, если центр кривизны расположен в отрицательных направлениях осей Z и Y соответственно.

Уравнения (15.6) и (15.7) описывают одну и ту же плоскость, поэтому приравняем их правые части и решим полученное выражение относительно $\sigma(y, z)$:

$$\sigma(y, z) = E[\epsilon_0 + c_y z + c_z y - \epsilon^T(y, z) - \epsilon^P(y, z)]. \quad (15.8)$$

Поскольку выделенный участок балки должен находиться в равновесии, то должны выполняться условия равновесия

* Правильнее записать $\epsilon_X(y, z)$ – индекс X указывает направление и означает продольные деформации, но так как в балочных конструкциях возникает одномерное напряжение состояния, для упрощения записи индекс X опущен.

$$\left. \begin{aligned} \int_F \sigma(y, z) dF &= N; \\ \int_F \sigma(y, z) z dF &= M_Z; \\ \int_F \sigma(y, z) y dF &= M_Y; \end{aligned} \right\} \quad (15.9)$$

Подставляя выражение (15.8) в (15.9), получим три совместных уравнения относительно трех неизвестных величин ϵ_0 , c_Y и c_Z , которые называют характерными деформациями сечения балки.

Решая эти уравнения, учтем, что интегрирование распространяется на всю площадь поперечного сечения балки. Так как координатные оси являются главными осями поперечного сечения, то статические и центробежные моменты равны нулю:

$$\int_F y dF = 0; \quad \int_F z dF = 0; \quad \int_F yz dF = 0.$$

Другие интегралы представляют собой:

$$\begin{aligned} \int_F dF &= F - \text{площадь поперечного сечения;} \\ \int_F y^2 dF &= J_Z - \text{момент инерции относительно оси } Z; \\ \int_F z^2 dF &= J_Y - \text{момент инерции относительно оси } Y. \end{aligned}$$

Учитывая эти выражения, получим формулы для определения характерных деформаций сечения балки:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_0 &= \frac{1}{EF} (N + N^T + N^p); \\ c_Y &= \frac{1}{EJ_Y} (M_Z + M_Z^T + M_Z^p); \\ c_Z &= \frac{1}{EJ_Z} (M_Y + M_Y^T + M_Y^p). \end{aligned} \right\} \quad (15.10)$$

где

$E \int_F \epsilon^T(y, z) dF = N^T$ – усилие, обусловленное неравномерным нагревом сечения выделенного участка балки;

$E \int_F \epsilon^p(y, z) dF = N^p$ – усилие, обусловленное развитием продольных пластических деформаций;

$E \int_F \epsilon^T(y, z) z dF = M_Z^T$ – момент в плоскости XOZ , обусловленный неравномерным нагревом сечения;

$E \int_F \epsilon^T(y, z) y dF = M_Y^T$ – момент в плоскости XOY , обусловленный неравномерным нагревом сечения;

$E \int_F \epsilon^p(y, z) z dF = M_Z^p$ – момент в плоскости XOZ , обусловленный развитием продольных пластических деформаций;

$E \int_F \epsilon^p(y, z) y dF = M_Y^p$ – момент в плоскости XOY , обусловленный развитием продольных пластических деформаций.

Полученные уравнения (15.10) являются универсальными в том смысле, что они справедливы для нагретых и не нагретых балок, работающих как в упругой, так и в упругопластической области. Но при этом, и это следует подчеркнуть, уравнения (15.10) справедливы, если известна на любой определенный момент нагружения вся предыстория внешнего и теплового нагружения, т. е. до этого момента прослеживалось развитие продольных упругих, температурных, пластических и действительных деформаций во времени от начала нагружения во всех точках сечения выделенного участка балки.

С этой точки зрения оценим следующую ситуацию: балка была подвергнута внешнему и тепловому нагружению, прослеживалась история нагружения, и в какой-то момент времени балка остыла, а внешнее нагружение сняли, т. е.:

$$N = 0; \quad M_Z = 0; \quad M_Y = 0; \quad N^T = 0; \quad M_Z^T = 0; \quad M_Y^T = 0.$$

Уравнения (15.10) преобразуются к виду:

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 &= \frac{N^p}{EF} = \frac{\int_F \varepsilon^p(y, z) dF}{F} = \frac{\Delta v}{F}; \\ c_Y &= \frac{M_Y^p}{EJ_Y} = \frac{\int_F \varepsilon^p(y, z) z dF}{J_Y} = \frac{\Delta v}{J_Y} z_c; \\ c_Z &= \frac{M_Z^p}{EJ_Z} = \frac{\int_F \varepsilon^p(y, z) y dF}{J_Z} = \frac{\Delta v}{J_Z} y_c. \end{aligned} \quad (15.11)$$

здесь $\Delta v = \int_F \varepsilon^p(y, z) dF$ – величина объемного изменения металла, обусловленного пластическим деформированием металла в продольном направлении, на единицу длины балки, см². В сварочной практике эту величину объемного изменения металла называют объемом продольных пластических деформаций, а в случае полного охлаждения – объемом остаточных продольных пластических деформаций, а в зависимости от знака величины объемного изменения: минус – объемом продольного укорочения, плюс – объемом продольного удлинения; z_c, y_c – координаты центра тяжести объема Δv , см (рис. 15.5, z , где, например, заштрихованная часть сечения балки – зона остаточных пластических деформаций):

$$\begin{aligned} z_c &= \frac{\int_F \varepsilon^p(y, z) z dF}{\int_F \varepsilon^p(y, z) dF}; \\ y_c &= \frac{\int_F \varepsilon^p(y, z) y dF}{\int_F \varepsilon^p(y, z) dF}. \end{aligned}$$

Если положить, что объемные изменения по длине балки одинаковы и координаты центров тяжести этих объемов в любом сечении балки неизменны, то

$$\Delta v(x) = \Delta v. \quad (15.12)$$

Соответственно:

$$\Delta V = \int_0^L \Delta v(x) dx = \Delta v L. \quad (15.13)$$

где ΔV – величина объемного изменения металла, обусловленная пластическим деформированием в продольном направлении на всю длину балки, см³; L – длина балки, см.

Значения кривизны в любом сечении по длине балки также одинаковы:

$$c_Y(x) = c_Y; c_Z(x) = c_Z. \quad (15.14)$$

Зависимости (15.11) представлены в форме, аналогичной той, которая дается в курсе «Сопротивление материалов» для балок, подвергаемых внецентренному сжатию или растяжению. Действительно, умножая числители и знаменатели правых частей формул (15.11) на модуль нормальной упругости, получим

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 &= \frac{N^p}{EF}; \\ c_Y &= \frac{N^p z_c}{EJ_Y}; \\ c_Z &= \frac{N^p y_c}{EJ_Z}. \end{aligned} \quad (15.15)$$

где $N^p = E \Delta v$. Величина N^p характеризует величину усилия, которое, будучи приложено в центре тяжести объема Δv , вызывает те же параметры деформации сечения, что и изменение объема металла, происходящее на единицу длины балки. Такое написание формул для определения характерных деформаций сечения балки позволяет свести определение деформаций балочных конструкций, обусловленных объемными изменениями металла, к решению задач об изгибе бруса.

Для определения перемещений точек оси балки имеем известные из сопротивления материалов дифференциальные зависимости

$$\frac{du_X}{dx} = \varepsilon_0; \quad \frac{d^2 u_Z}{dx^2} = c_Y; \quad \frac{d^2 u_Y}{dx^2} = c_Z. \quad (15.16)$$

где u_X, u_Y, u_Z – продольные и поперечные перемещения точек оси балки.

Интегрируя первое уравнение от 0 до L , находим изменение длины балки по ее центральной оси:

$$\Delta L_0 = u_x(L) = \int_0^L \epsilon_0 dx.$$

Подставляя значение ϵ_0 из (15.11), с учетом (15.13) имеем

$$\Delta L_0 = \frac{\Delta V}{F}. \quad (15.17)$$

Интегрируя второе и третье уравнения (15.16) в пределах от 0 до x , находим углы поворота текущего сечения x :

$$\begin{aligned} \varphi_Y &= \frac{du_Z}{dx} = \int_0^x c_Y dx + \varphi_Y(0); \\ \varphi_Z &= \frac{du_Y}{dx} = \int_0^x c_Z dx + \varphi_Z(0). \end{aligned} \quad (15.18)$$

Интегрируя (15.18) еще раз от 0 до x , получим уравнение изогнутой продольной оси балки

$$\left. \begin{aligned} u_Z(x) &= \int_0^x \int_0^x c_Y dx dx + x\varphi_Y(0) + u_Z(0); \\ u_Y(x) &= \int_0^x \int_0^x c_Z dx dx + x\varphi_Z(0) + u_Y(0). \end{aligned} \right\} \quad (15.19)$$

Постоянные интегрирования $\varphi_Y(0)$, $\varphi_Z(0)$ и $u_Z(0)$, $u_Y(0)$ характеризуют углы поворота и перемещений оси балки в нулевом сечении ($x = 0$).

При сделанном ранее предположении, что объемные изменения постоянны по длине балки (15.12) – (15.14), эпюры кривизны c_Y и c_Z представляют собой прямоугольники (эпюра кривизны c_Y представлена на рис. 15.6, а).

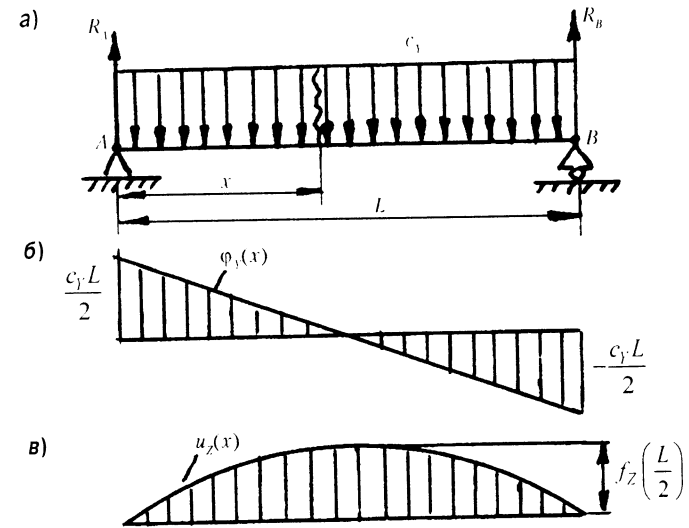


Рис. 15.6. Определение изгиба балки:

а – эпюра кривизны $c_Y = \text{const}$; б – эпюра φ_Y ; в – эпюра u_Z

Реакции на опорах от фиктивной нагрузки c_Y

$$R_A = R_B = \frac{c_Y L}{2}. \quad (15.20)$$

Перерезывающая сила в сечении x , определяющая угол поворота сечения (рис. 15.6, б):

$$\varphi_Y(x) = R_A - c_Y x = \frac{c_Y L}{2} - c_Y x = c_Y \left(\frac{L}{2} - x \right).$$

Отсюда

$$\varphi_Y(0) = \frac{c_Y L}{2}; \quad \varphi_Y(L) = -\frac{c_Y L}{2}.$$

Следовательно, угол поворота концов балки один относительно другого

$$\varphi_Y = \varphi(0) - \varphi_Y(L) = \frac{c_Y L}{2} - \left(-\frac{c_Y L}{2} \right) = c_Y L. \quad (15.21)$$

Аналогично:

$$\varphi_Z = c_Z L. \quad (15.22)$$

Подставив значение c_Y и c_Z из (15.11) и учитывая (15.13), получим

$$\left. \begin{aligned} \varphi_Y &= \frac{\Delta V}{J_Y} z_c; \\ \varphi_Z &= \frac{\Delta V}{J_Z} y_c. \end{aligned} \right\} \quad (15.23)$$

Изгибающий момент в сечении x , определяющий прогиб балки $u_Z(x)$ в этом сечении (рис. 15.6, в):

$$u_Z(x) = R_A x - c_Y x \frac{x}{2} = \frac{c_Y x}{2} (L - x).$$

Отсюда максимальный прогиб в среднем сечении балки (стрелка прогиба)

$$f_Z \left(\frac{L}{2} \right) = u_Z \left(\frac{L}{2} \right) = c_Y \frac{L^2}{8} = \frac{\varphi_Y L}{8}. \quad (15.24)$$

Аналогично:

$$f_Y \left(\frac{L}{2} \right) = u_Y \left(\frac{L}{2} \right) = c_Z \frac{L^2}{8} = \frac{\varphi_Z L}{8}. \quad (15.25)$$

Учитывая разобщенность полученных в настоящем подразделе основных формул, связывающих объемные изменения металла с деформациями и перемещениями точек балочной конструкции, приведем их в компактном виде:

$$\left. \begin{aligned} \Delta L_0 &= \frac{\Delta V}{F}; \\ \varphi_Y &= \frac{\Delta V}{J_Y} z_c; \\ \varphi_Z &= \frac{\Delta V}{J_Z} y_c; \\ f_Z \left(\frac{L}{2} \right) &= \frac{\varphi_Y L}{8}; \\ f_Y \left(\frac{L}{2} \right) &= \frac{\varphi_Z L}{8}. \end{aligned} \right\} \quad (15.26)$$

В дальнейшем формулы (15.26) будут использованы для расчетной оценки остаточных геометрических искажений сварных конструкций балочного типа. Следует также заметить, что полученные формулы могут быть расчетными и в случаях, когда объемные изменения обусловлены и другими причинами.

Определение же объемных изменений Δv и ΔV в процессе сварочного нагрева и охлаждения является специфической сварочной задачей, рассматриваемой в следующих разделах.

16. ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВАРКЕ

16.1. ОСНОВНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ, ПРИНИМАЕМЫЕ В ИНЖЕНЕРНЫХ МЕТОДАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ

В настоящее время еще не представляется возможным достаточно достоверно описать реальные процессы, происходящие в металлах, при специфичном сварочном нагреве. Поэтому возникает необходимость разработки приближенных расчетных методов, которые должны быть просты, но в то же время обеспечивать достаточную для инженерной практики точность. Удовлетворить одновременно требованиям простоты и точности можно путем выбора эффективных расчетных схем, учитывающих основные, определяющие факторы и пренебрегающих второстепенными особенностями процесса развития сварочных деформаций и напряжений.

Как отмечалось, процесс развития сварочных деформаций и напряжений связан с обратимыми и необратимыми объемными изменениями металла, причем эти объемные изменения в силу локальности сварочного нагрева охватывают достаточно узкую область металла, прилегающую к шву. Поэтому объемные изменения в районе сварных соединений одинаковые как в сложной конструкции, так и в простейших элементах, т. е. практически не зависят от жесткости конструкции. Это же обстоятельство позволяет общую задачу определения сварочных деформаций и напряжений разделить на две, что является одной из основных идей ее приближенного решения. В первой определяют остаточные объемные изменения, обусловленные сварочным нагревом и охлаждением, – *термомеханическая задача*. Во второй определяют геометрическое искажение конструкции – *деформационная задача*.

При решении термомеханической задачи основное значение имеет характер распределения температуры, деформаций и напряжений в относительно узкой области, расположенной за источником теплоты и прилегающей к оси его перемещения. Описание процесса распространения теплоты в этой области может быть существенно упрощено принятием схем мощных быстродвижущихся источников теплоты, а распределение деформаций и напряжений – принятием допущения об одномерности напряженного состояния. В силу незначительного влия-

ния жесткости конструкции решение термомеханической задачи получают на простейших элементах, сосредоточивая внимание на указанной выше области металла, а принятие допущения о механических свойствах металла (см. подразд. 15.1) значительно упрощает рассмотрение процесса теплового нагружения.

Деформационная задача не является специфической. Аналогичные задачи рассматриваются в теории остаточных напряжений, вызываемых другими технологическими процессами. Решение их может быть выполнено как методами прикладной теории упругости, так и методами сопротивления материалов. Деформационная задача (см. подразд. 15.2) уже рассмотрена.

Прорезюмируем замечания об основных упрощениях и допущениях, принимаемых в инженерных методах определения сварочных деформаций и напряжений.

1. Задача в целом делится на две части – термомеханическую и деформационную.
2. Целью термомеханической задачи является оценка объемных изменений в районе сварного соединения.
3. Целью деформационной задачи является оценка геометрических искажений конструкции в целом.
4. Решения термомеханических задач выполняются на простейших элементах при следующих допущениях:
 - предполагается одномерность напряженного состояния и используется гипотеза плоских сечений;
 - принимается диаграмма растяжения-сжатия для идеального упругопластического материала и упрощенная зависимость механических свойств от температуры;
 - используются схемы мощных быстродвижущихся источников теплоты.

Следует отметить, что принципиальным является *допущение об одномерности напряженного состояния*. На чем же базируется это допущение? При сварке листовых конструкций в области позади источника изотермические поверхности вытягиваются, и градиенты температур вдоль оси шва становятся значительно меньшими, чем градиенты температур поперек шва. Поэтому, если исключить из рассмотрения область впереди источника, которая не оказывает заметного влияния на дальнейший процесс образования деформаций и напряжений, то можно пренебречь изменениями температуры вдоль оси шва, что и позволяет считать задачу одномерной и пренебречь напряжениями τ_{xy} и σ_y по сравнению с продоль-

ными напряжениями σ_y . Усиливает это допущение наличие зоны разупрочненного металла, нагретой выше температуры T^* , расположенной узкой полосой позади источника и разделяющей область металла в районе высокого нагрева на две части, между которыми нет силового взаимодействия. Погрешности от принятия допущения одномерности напряженного состояния тем меньше, чем выше скорость сварки и ниже коэффициент теплопроводности металла.

16.2. ОБРАЗОВАНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ

Под кинетикой продольных сварочных деформаций и напряжений понимают процесс их образования и развития в течение всего периода нагрева и охлаждения изделия.

Рассмотрим образование продольных сварочных деформаций и напряжений при сварке простейшей балочной конструкции (балки-полоски) с центральным продольным швом (сварка встык двух узких пластин). Допустим, что материал пластин – малоуглеродистая сталь и что неравномерность нагрева пластин по толщине можно пренебречь. Выделим двумя близкими сечениями aa и bb , перпендикулярными к оси шва, участок балки-полоски dx и отнесем его к единице длины, т. е. этот участок будет представлять полоску в направлении y^* единичной ширины (рис. 16.1, а). Разделим ее продольными сечениями на ряд элементов, каждый из которых будет представлять собою элементарную призму с сечением sd_y и длиной, равной единице (рис. 16.1, б). Поскольку объем призмы бесконечно мал, можно считать, что в процессе нагрева и охлаждения балки температура каждой призмы одинакова по объему и изменяется во времени, как температура ее центра тяжести, т. е. по ТЦ точки, совпадающей с центром тяжести призмы.

При обычной жесткости свариваемых элементов относительные действительные деформации вдоль оси x , обуславливающие фактическое изменение длины призм, значительно меньше относительных температурных деформаций. Поэтому в первом приближении действительными продольными деформациями ϵ_x можно пренебречь и полагать, что длина призм в процессе сварочного нагрева и охлаждения не изменяется, т. е. они находятся в условиях жесткого закрепления ($\epsilon_x = 0$).

* xOy – местная система координат, связанная с источником сварочного нагрева.

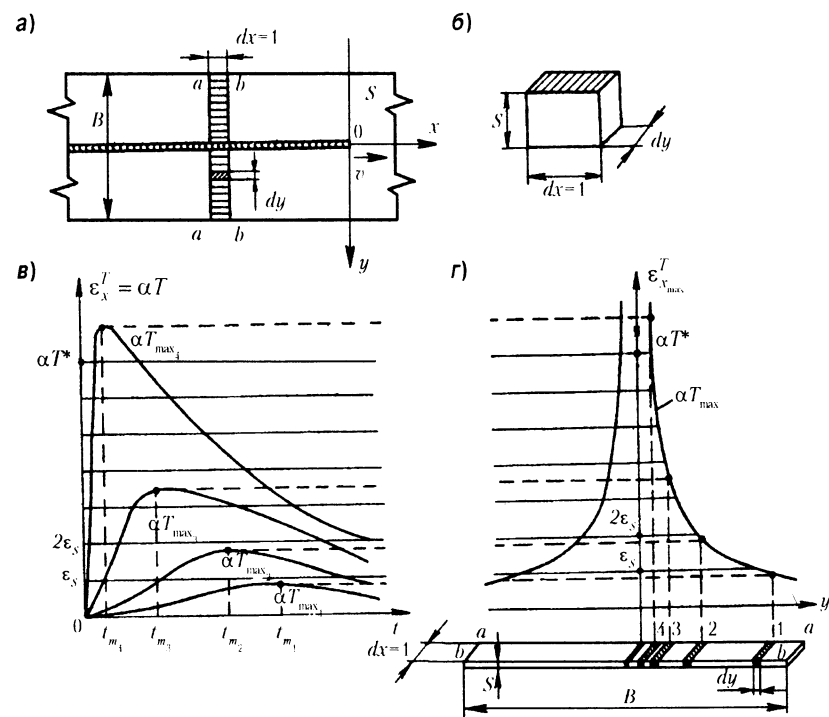


Рис. 16.1. Образование продольных сварочных деформаций и напряжений: а – выделение элементарных призм в балке-полоске; б – элементарная призма; в – кривые свободных температурных деформаций элементарных призм, расположенных на различных расстояниях от оси шва; г – распределение максимальных свободных температурных деформаций по сечению балки-полоски

На рис. 16.1, в изображены кривые ТЦ для ряда точек, расположенных на разных расстояниях от оси шва. Очевидно, что путем изменения масштаба кривые ТЦ призм можно рассматривать как кривые их свободных температурных деформаций, в частности, в продольном направлении $\epsilon_x^T = \alpha T(t)$, т. е. длина призм, если бы они были свободны, изменялась бы при нагреве согласно этим кривым. Но сделанное выше допущение о неизменяемости длины призм в процессе сварочного нагрева и охлаждения предполагает:

- если отдельная призма нагревается, то она хочет увеличить свою длину, но так как это запрещено, в ней появляются упругие деформации сжатия и соответствующие сжимающие напряжения;

- если же призма охлаждается, то она хочет уменьшить свою длину, но так как это тоже запрещено, в ней появляются упругие деформации растяжения и соответствующие растягивающие напряжения. В случае, если призма была предварительно нагружена, например при нагреве сжимающими напряжениями, то при последующем охлаждении нагружению будет предшествовать упругая тепловая разгрузка.

Следует также отметить, что если в рассматриваемых призмах в процессе теплового нагружения получают свое развитие не только упругие, но и пластические деформации (неизбежность их развития показана в примере подразд. 14.2), то для оценки конечного (остаточного) состояния при сварочном нагреве и охлаждении следует проследить всю историю теплового нагружения конкретных призм.

Проследим за развитием деформаций и напряжений в отдельных призмах в зависимости от их ТЦ (кривых свободных температурных деформаций) на совмещенных графиках (рис. 16.2): слева график ϵ_x-t , иллюстрирующий термдеформационный процесс во времени, справа – диаграмма растяжения-сжатия $\sigma-\epsilon$, совмещенная по масштабу относительных деформаций с левым графиком. На левом графике для последующих рассуждений фиксируется зеркальное отражение относительно оси $0-t$ кривой свободных температурных деформаций конкретных призм ϵ_x^I .

Начнем с призмы 1, расположенной в зоне, где $\alpha T_{\max} < \epsilon_x$ (см. рис. 16.1, в, з). Изменение ее свободных температурных деформаций (только с другим знаком) характеризуется кривой $0a, b_1$ (рис. 16.2, а). С повышением температуры в призме возникают упругие деформации сжатия, равные по величине, но с другим знаком, свободным температурным деформациям $\epsilon_x^I(t) = -\alpha T(y_1, t)$. В момент максимального нагрева t_{m_1} упругие деформации сжатия достигают наибольшего значения (точка a), соответствующие сжимающие напряжения на диаграмме $\sigma-\epsilon$ (точка A_1). Последующее охлаждение обусловит упругую тепловую разгрузку, т. е. уменьшение величины упругих деформаций сжатия и соответствующих сжимающих напряжений. После полного охлаждения произойдет полная упругая разгрузка (точки b_1 и B_1 соответственно). Таким образом, процесс теплового нагружения рассматриваемой призмы сопровождается развитием только временных упругих деформаций сжатия – кривая $0a, b_1$ (эпюра изменения упругих деформаций заштрихована), на совмещенной диаграмме $\sigma-\epsilon$ изменение временных сжимающих напряжений происходит по ломаной прямой $0A_1B_1$.

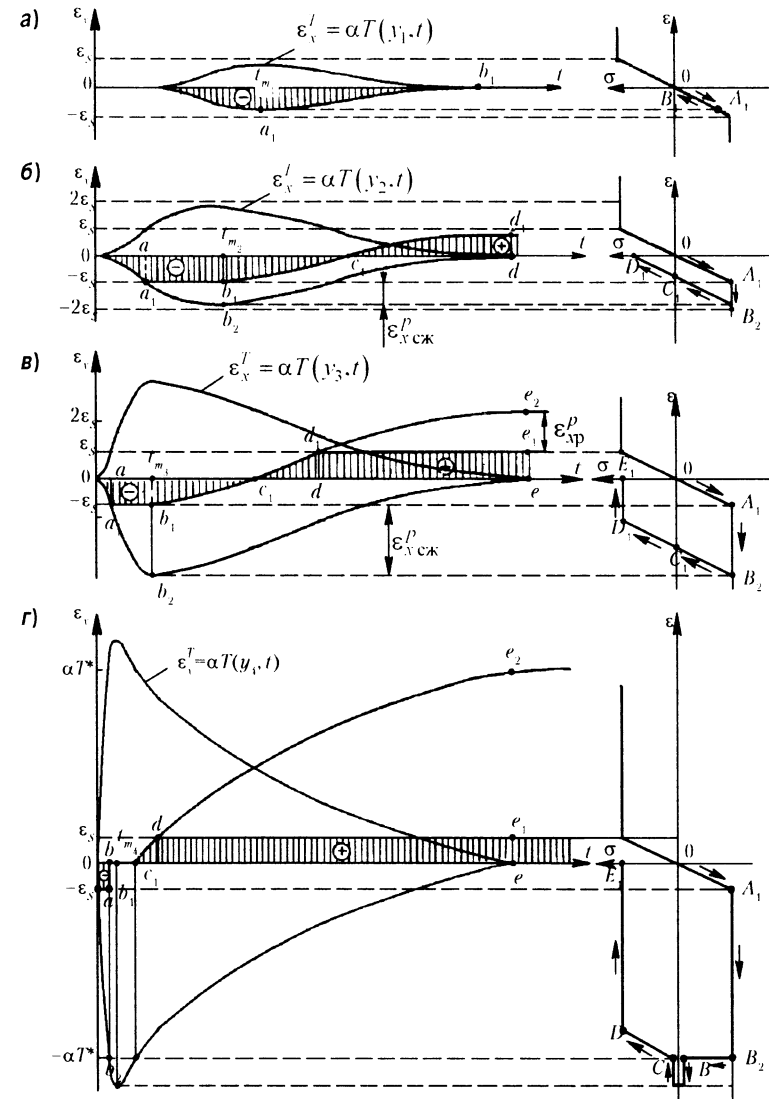


Рис. 16.2. Развитие упругопластических деформаций в элементарных призмах:

- а – в призме 1, расположенной в зоне, где $\alpha T_{\max} < \epsilon_x$;
- б – в призме 2, расположенной в зоне, где $\epsilon_x \leq \alpha T_{\max} < 2\epsilon_x$;
- в – в призме 3, расположенной в зоне, где $2\epsilon_x \leq \alpha T_{\max} < \alpha T^*$;
- г – в призме 4, расположенной в зоне, где $\alpha T_{\max} \geq \alpha T^*$

Анализируя полученный результат, можно утверждать, что во всех периферийных призмах, у которых $\alpha T_{\max} < \epsilon_s$, конечное (остаточное) состояние призм ничем не отличается от исходного, т. е. $\epsilon_{\text{ост}}^s = 0$.

Перейдем к призме 2, расположенной в зоне, где $\epsilon_s \leq \alpha T_{\max} < 2\epsilon_s$ (см. рис. 16.1, в, з). Изменение ее свободных температурных деформаций (с другим знаком) характеризуется кривой $0a_1b_2d$ (рис. 16.2, б). Аналогично, как и для призмы 1, с повышением температуры в рассматриваемой призме возникнут упругие деформации сжатия и соответствующие сжимающие напряжения, но в какой-то момент нагрева a значения их достигнут предельных величин ($-\epsilon_s$ – точка a_1 и $-\sigma_s$ – точка A_1 соответственно). Дальнейший нагрев призмы вызовет появление и развитие пластических деформаций сжатия по кривой a_1b_2 (на диаграмме σ - ϵ на участке A_1B_2), величины же соответственно упругих деформаций сжатия и сжимающих напряжений остаются неизменными. В момент максимального нагрева t_{m_2} пластические деформации сжатия достигают наибольшей величины и характеризуются соответственно равными отрезками b_1b_2 и A_1B_2 . Поскольку пластические деформации необратимы, то при последующем охлаждении их величина остается неизменной, изменение же упругих деформаций и напряжений сопровождается вначале упругой тепловой разгрузкой (соответственно точки c_1 и C_1), а затем – упругой тепловой загрузкой при охлаждении, т. е. появлением и развитием упругих деформаций растяжения и соответствующих растягивающих напряжений. Упругая разгрузка и последующая загрузка характеризуются кривой $b_1c_1d_1$, эквидистантной кривой температурных деформаций b_2d . Момент полного охлаждения характеризуется точками d_1 и D_1 соответственно, где величина остаточной упругой деформации соответствует отрезку dd_1 , по величине равному отрезку b_1b_2 , который в свою очередь характеризует величину максимальных пластических деформаций сжатия.

Таким образом, процесс теплового нагружения призмы 2 сопровождается развитием необратимых объемных изменений, обусловленных упругопластическим деформированием металла призмы в продольном направлении (эпюра изменения упругих деформаций заштрихована). Эти объемные изменения и определяют появление остаточных растягивающих напряжений, величина которых для рассматриваемой призмы пропорциональна величине максимальных продольных пластических деформаций сжатия $\epsilon_{\text{сж}}^p$ * со знаком минус:

* Деформации сжатия, снимающие напряжения, по определению, отрицательны.

$$\sigma_{\text{ост}} = E\epsilon_{\text{ост}}^s; \quad \epsilon_{\text{ост}}^s = -\epsilon_{\text{сж}}^p. \quad (16.1)$$

Анализируя полученный результат, можно утверждать, что во всех призмах, у которых $\epsilon_s \leq 2T_{\max} < 2\epsilon_s$, конечное (остаточное) состояние отлично от исходного. Развитие необратимых объемных изменений, обусловленных пластическими деформациями одного знака (сжатия) в продольном направлении, определяет появление растягивающих напряжений: от $\sigma_{\text{ост}} = 0$ для призмы, у которой $\alpha T_{\max} = \epsilon_s$, до $\sigma_{\text{ост}} = \sigma_s$ для призмы, у которой $\alpha T_{\max} = 2\epsilon_s$.

Процесс упругопластического деформирования призмы 3, расположенной еще ближе к оси шва (в зоне, где $2\epsilon_s \leq \alpha T_{\max} < \alpha T^*$ (см. рис. 16.1, в, з)), при нагреве по ее ТЦ до момента времени d (точка d_1) не отличается от рассмотренного выше (рис. 16.2, в). В этот момент упругие деформации растяжения и соответствующие растягивающие напряжения достигают предельных значений соответственно ϵ_s и σ_s (точки d_1 и D_1). Дальнейшее охлаждение приводит к повторному пластическому деформированию с образованием и развитием пластических деформаций растяжения $\epsilon_{\text{рп}}$, наибольшая величина которых характеризуется отрезком e_1e_2 , равным отрезку D_1E_1 на диаграмме σ - ϵ .

После полного охлаждения величина остаточных продольных напряжений в рассматриваемой призме будет пропорциональна суммарной пластической деформации:

$$\sigma_{\text{ост}} = E\epsilon_{\text{ост}}^s = \sigma_s; \quad \epsilon_{\text{ост}}^s = -(\epsilon_{\text{сж}}^p + \epsilon_{\text{рп}}^p) = -\sum \epsilon_{\text{р}}^p = \epsilon_s. \quad (16.2)$$

Анализируя полученный результат, можно утверждать, что во всех призмах, у которых $2\epsilon_s \leq \alpha T_{\max} < \alpha T^*$, конечное (остаточное) состояние отлично от исходного. Развитие необратимых объемных изменений, обусловленных пластическими деформациями разных знаков в продольном направлении, причем значение суммарной пластической деформации для любой призмы из этой зоны одинаково и равно $-\epsilon_s$, определяет появление одинаковых остаточных растягивающих напряжений: $\sigma_{\text{ост}} = \sigma_s$.

Процесс развития упругопластических деформаций в призме 4, расположенной в непосредственной близости к оси шва (зоне, где $\alpha T_{\max} \geq \alpha T^*$, рис. 16.2, з), характерен тем, что с момента времени (точка b) металл призмы нагрет выше температуры T^* и находится в разупрочненном состоянии. Этот период (до времени c_1) сопровождается только развитием разных по знаку, но одинаковых по вели-

чине пластических деформаций. При охлаждении ниже температуры T^* (время s) металл призмы вновь обретает упругие свойства и происходит тепловое нагружение призмы при охлаждении. Конечное состояние во всех призмах, у которых $\alpha T_{\max} \geq \alpha T^*$, аналогично состоянию призмы из предыдущей зоны: $\sigma_{\text{ост}} = \sigma_s$.

Обобщая полученные результаты по конечному состоянию в отдельных призмах, следует отметить, что, если призма испытывает растягивающие напряжения, то она стремится укоротиться. Это общее стремление всех призм, в которых произошли необратимые объемные изменения, укоротиться обуславливает появление сжимающей силы N_s^p (подразд. 15.2):

- по величине, равной $N_s^p = E \Delta r_s$, где $\Delta r_s = \int \epsilon_s^p dF$ – объем остаточных продольных пластических деформаций или просто объем продольного укорочения сварного соединения балки единичной длины (ϵ_s^p – отрицательны);
- и приложенной в центре тяжести объема Δr_s .

Определение объема продольного укорочения сварного соединения

Обобщая проведенный выше анализ по тепловому нагружению всех призм, получаем эпюру, характеризующую распределение остаточных пластических деформаций по ширине сварного соединения (рис. 16.3, а). В этом случае объем продольного укорочения балки единичной длины или, другими словами, приходящийся на единицу длины шва, ассоциируется с объемом (рис. 16.3, б), имеющим размерность квадратный сантиметр, так как ϵ_s – безразмерная величина. Определим величину этого отрицательного объемного изменения

$$\Delta r_s = \int_F \epsilon_s^p dF = s \int_{-\frac{B}{2}}^{+\frac{B}{2}} \epsilon_s^p dy = s S^p. \quad (16.3)$$

Интеграл в этом выражении представляет собой площадь полученной заштрихованной эпюры. Обозначая ее S^p и учитывая, что она должна быть взята со знаком минус, так как ϵ_s^p отрицательны, имеем

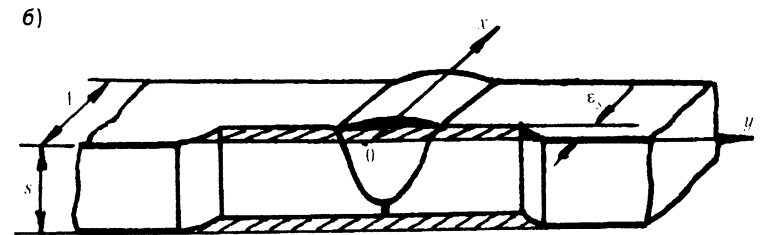
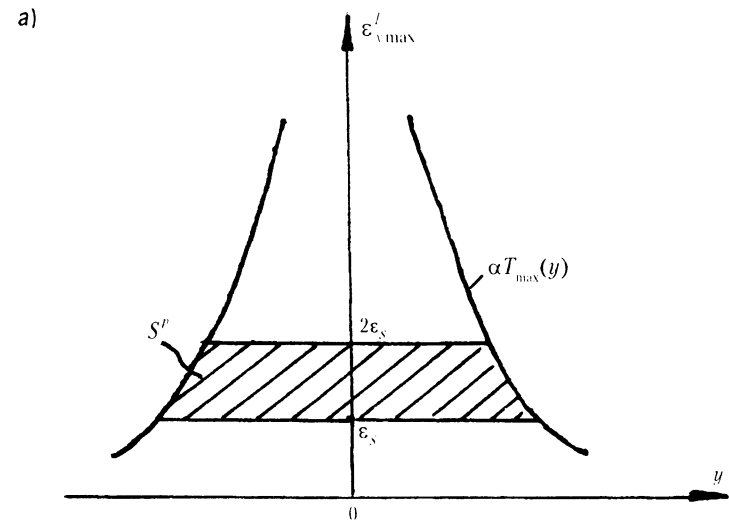


Рис. 16.3. Определение объема продольного укорочения сварного соединения: а – распределение остаточных продольных пластических деформаций (эпюра заштрихована); б – иллюстрация изменения объема балки единичной длины, обусловленного необратимыми пластическими деформациями в продольном направлении

$$S^p = - \int_{\epsilon_s}^{2\epsilon_s} 2y d\epsilon, \quad (16.4)$$

где y – абсциссы точек кривой αT_{\max} .

Воспользуемся решением (13.41) для определения максимальных температур (подвижный линейный источник в пластине):

$$T_{\max}(y) = \frac{0,484q}{\tau_{\text{ср}} 2y}$$

Заметив, что $\frac{q}{\tau} = q_{\text{п}}$ и во взятом решении не учтен теплообмен с окружающей средой, получим выражение для максимальных температурных деформаций

$$\varepsilon_{\max}^T = \alpha T_{\max}(y) = 0,484 \frac{\alpha}{\text{ср}} \frac{1}{s} \frac{q_{\text{п}}}{2y} \quad (16.5)$$

Из этого выражения

$$2y = 0,484 \frac{\alpha}{\text{ср}} \frac{1}{s} \frac{q_{\text{п}}}{\varepsilon_{\max}^T} \quad (16.6)$$

Подставив значение $2y$ в выражение (16.4), получим

$$\begin{aligned} S'' &= -0,484 \frac{\alpha}{\text{ср}} \frac{q_{\text{п}}}{s} \int_{\varepsilon}^{2\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{\varepsilon} = -0,484 \frac{\alpha}{\text{ср}} \frac{q_{\text{п}}}{s} \ln 2 = \\ &= -0,335 \frac{\alpha}{\text{ср}} \frac{q_{\text{п}}}{s} \end{aligned} \quad (16.7)$$

Таким образом, с учетом выражений (16.7) и (16.3) объем продольного укорочения сварного соединения

$$\Delta v_x = S'' s = -0,335 \frac{\alpha}{\text{ср}} q_{\text{п}} = \mu_x \frac{\alpha}{\text{ср}} q_{\text{п}}, \quad (16.8)$$

где $\mu_x = -0,335$ – коэффициент продольного укорочения сварного соединения.

Формула (16.8) является одной из важнейших в теории сварочных деформаций и напряжений. Она устанавливает связь между остаточным изменением объема вдоль оси шва с параметрами режима сварки, теплофизическими и механическими свойствами металла. Следует при этом отметить:

- тепловое воздействие дуги определяется только погонной энергией сварки;

- влияние теплофизических свойств металла определяется только одной обобщенной характеристикой $\frac{\alpha}{\text{ср}}$;
- влияние механических свойств определяется значением коэффициента продольного укорочения $\mu_x = -0,335$. Это значение справедливо для материалов, которые можно считать идеальными упругопластическими металлами, т. е. действительную диаграмму растяжения-сжатия которых можно идеализировать диаграммой Прандтля. Для металлов, у которых подобная идеализация механических свойств не приемлема, значение μ_x отлично от $-0,335$;
- полученная формула дает достаточную для практических целей точность, однако, в некоторых случаях, указанных ниже, возможно ее уточнение.

Влияние теплоотдачи на объем продольного укорочения сварного соединения

При сварке конструкций из элементов малых толщин влияние теплоотдачи может оказаться существенным. По литературным данным, теплоотдача при сварке элементов малых и средних толщин уменьшает объем продольного укорочения на 10...20%, поэтому в формулу (16.8) рекомендуется вводить поправочный коэффициент K_T , учитывающий влияние теплоотдачи, и в практических расчетах принимать $K_T = 0.85$.

Влияние начального напряженного состояния на объем продольного укорочения сварного соединения

В ряде случаев свариваемые элементы испытывают напряжения еще до начала сварки. Начальное напряженное состояние, которое может быть вызвано внешним нагружением или предшествующими технологическими операциями (в том числе и выполнением предшествующих сварных швов), оказывает существенное влияние на процесс образования деформаций и напряжений и, следовательно, на величину объема продольного укорочения. Рассмотрим это влияние несколько подробнее с целью возможного получения эффективного способа уменьшения ожидаемых сварочных деформаций и напряжений.

Так же, как и в начале настоящего подраздела, рассмотрим простейшую балочную конструкцию (балку-полоску) с центральным продольным швом (см. рис. 16.1), который производится после предварительного растяжения балки-полоски в продольном направлении. Предположим, что начальные растягивающие напряжения $\sigma_{\text{н}}$ составляют часть от σ_s , т. е. $\sigma_{\text{н}} = \beta \sigma_s$ ($\varepsilon_{\text{н}} = \beta \varepsilon_s$). Как и ранее, выделим в балке участок единичной длины и разобьем его на элементарные призмы.

Проследим за развитием упругопластических деформаций в отдельных призмах на упрощенной диаграмме (рис. 16.4, а). Исходное состояние всех призм характеризуется точкой 0 на диаграмме σ - ϵ . Соответственно, на величину начальных деформаций должна быть смещена вправо ось температурных деформаций графика $\epsilon_{T_{\max}}^I$. Нагрев призм приводит сначала к снятию растягивающих напряжений и лишь затем – к появлению напряжений сжатия.

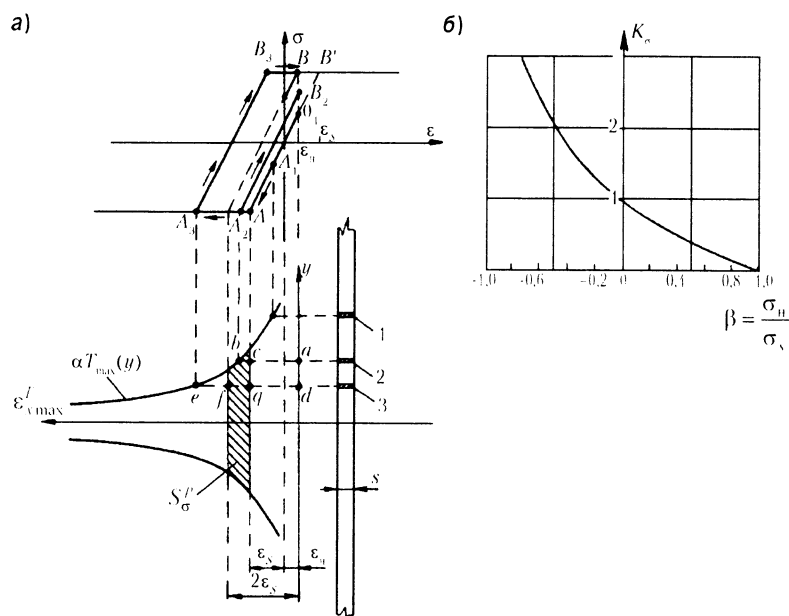


Рис. 16.4. Влияние начальных напряжений на величину объема продольного укорочения сварного соединения:

а – распределение остаточных продольных пластических деформаций (эпюра заштрихована);

б – зависимость коэффициента K_σ от параметра $\beta = \frac{\sigma_0}{\sigma_s}$

На примере призмы 1 видно, что призмы, у которых $\alpha T_{\max} \leq \epsilon_s + \epsilon_0$, процесс нагрева и охлаждения сопровождается изменением только упругих деформаций, конечное состояние – возврат в точку 0.

Для призмы 2 максимальные температурные деформации характеризуются отрезком ab , цикл изменения напряжений – ломаная линия

$0A_2B_2$. Следовательно, пластические деформации в призме соответствуют отрезку AA_2 , равному отрезку bc .

Аналогично для призмы 3, максимальные температурные деформации которой характеризуются отрезком de , цикл изменения напряжений – $0A_3B_3B'$. При этом призма претерпевает при нагреве пластические деформации сжатия AA_3 , а при охлаждении – пластические деформации растяжения B_3B' . Остаточные или суммарные пластические деформации в призме характеризуются отрезком BB' , равным отрезку fq .

Охватывая все призмы, получим эпюру распределения по ширине балки-полоски остаточных пластических деформаций (заштрихованная площадь). Площадь этой эпюры S_σ^p характеризует величину объема продольного укорочения с учетом начального напряженного состояния. Определяем ее по формуле (16.7), заменив соответственно пределы интегрирования:

$$S_\sigma^p = -0,484 \frac{\alpha q_{II}}{c\rho s} \int_{\epsilon_s + \epsilon_0}^{2\epsilon_s} \frac{d\epsilon}{\epsilon} = -0,484 \frac{\alpha q_{II}}{c\rho s} \ln \frac{2\epsilon_s}{\epsilon_s + \epsilon_0}. \quad (16.9)$$

Рекомендуется вводить в формулу (16.8) поправочный коэффициент K_σ , учитывающий влияние начального напряженного состояния:

$$K_\sigma = \frac{S_\sigma^p}{S^p} = \frac{\ln \frac{2}{1+\beta}}{\ln 2} = 1 - \frac{\ln(1+\beta)}{\ln 2}, \quad (16.10)$$

где $\beta = \frac{\epsilon_0}{\epsilon_s}$.

Зависимость коэффициента K_σ от β приведена на рис. 16.4, б, из которого видно, что растягивающие начальные напряжения приводят к уменьшению, а сжимающие – к увеличению объема продольного укорочения сварного соединения.

В практических расчетах можно рекомендовать оценку K_σ по приближенным зависимостям:

$$\begin{aligned} \bullet \text{ растяжение: } & \beta = \frac{\epsilon_0}{\epsilon_s} > 0; & K_\sigma = 1 - \beta; \\ \bullet \text{ сжатие: } & \beta = \frac{\epsilon_0}{\epsilon_s} < 0; & K_\sigma = 1 - 2\beta. \end{aligned} \quad (16.11)$$

Замечание: обычно в основную формулу (16.8) вводят еще один поправочный коэффициент K_s , учитывающий влияние толщины свариваемых элементов. При увеличении толщины свариваемых элементов меняется мерность распространения теплоты, приводящая к изменению области, в которой происходят необратимые объемные изменения. При наплавке валика на полубесконечное тело ($s \rightarrow \infty$) значимый коэффициент в формуле (16.8) уменьшается до значения $-0,255$. В практических расчетах при сварке элементов малых и средних толщин, в основном и применяемых в судовых конструкциях, рекомендуется брать значения $K_s = 1$.

При одновременном учете влияния теплоотдачи, начального напряженного состояния и толщины свариваемых элементов формула для определения объема продольного укорочения сварного соединения приобретает вид

$$\Delta v_x = -0,335 K_T K_\sigma K_s \frac{\alpha}{\rho} q_{нл}. \quad (16.12)$$

Коэффициент продольного укорочения сварного соединения, таким образом, принимает вид

$$\mu_x = -0,335 K_T K_\sigma K_s. \quad (16.13)$$

Раздельный учет факторов, оказывающих влияние на величину объема продольного укорочения сварного соединения, существенно упрощает задачу его определения.

16.3. ОБРАЗОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Рассмотрим, как и в предыдущем подразделе, простейшую балочную конструкцию (балку-полоску) с центральным сварным швом, полагая, что неравномерностью нагрева по толщине свариваемых элементов можно пренебречь. На рис. 16.5, а представлен момент, когда сварочная дуга находится на каком-то участке балки в точке 0 подвижной системы координат x, y , связанной с источником. Выделим в балке-полоске в подвижной системе координат три области:

- 1 – область, нагретую выше температуры полного разупрочнения металла T^* (ограниченную изотермой T^*);

- 2 – область нагретого металла, ограниченную изотермой T_0 (T_0 – исходная или начальная температура металла балки);
- 3 – область холодного металла, имеющего температуру T_0 .

Заметим, что область холодного металла охватывает нагретую область с трех сторон и создает для нее жесткий подковообразный контур.

Выделим двумя близкими сечениями aa и bb , перпендикулярными к оси шва, участок балки dx и отнесем его к единице длины. Продольными сечениями разделим этот участок на ряд элементарных призм сечением $s \cdot dy$ и длиной, равной единице (рис. 16.5, б).

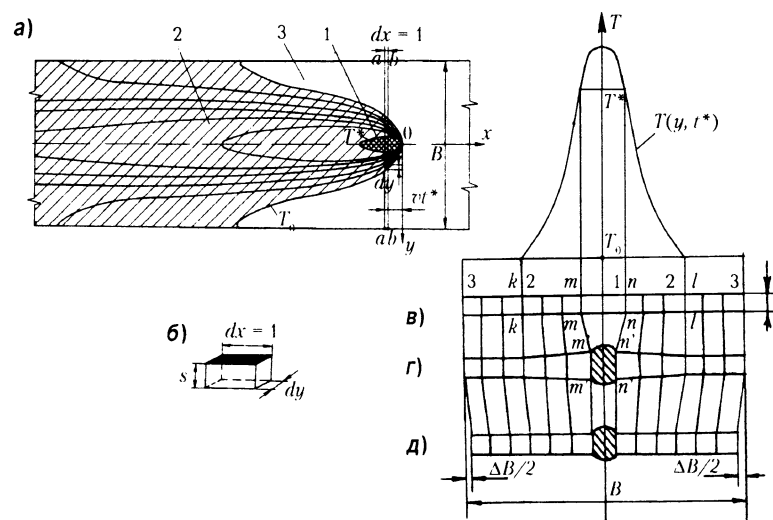


Рис. 16.5. Образование поперечных сварочных деформаций:

- а – температурное поле предельного состояния, выделение трех температурных областей, специфичных для сварочного нагрева;
- б – элементарная призма; в – мгновенное распределение температуры по ширине участка балки в момент t^* ;
- г – сечение балки в момент t^* ;
- д – сечение балки после полного охлаждения

Оговорим предварительно условия возможного протекания деформационных процессов в призмах в поперечном направлении. На основании сделанного ранее принципиального допущения об одномерности напряженного состояния (см. подразд. 16.1), при тепловом нагружении любой призмы по ее ТЦ в поперечном направлении воз-

можно развитие только свободных температурных деформаций, так как принципиально ничто не ограничивает изменение линейных размеров призм в поперечном направлении (поперечные напряжения σ_y в процессе нагрева и охлаждения призм равны нулю). В то же время при определенных условиях нельзя исключить возможное пластическое деформирование отдельных призм в поперечном направлении, металл которых находится в полностью разупрочненном состоянии. В предположении, что в поперечном направлении возможны объемные изменения, обусловленные пластическим деформированием, для оценки конечного состояния в призмах следует проследить всю историю их теплового нагружения.

Возможны два подхода рассмотрения истории теплового нагружения призм выделенного участка балки:

- выделенный участок балки единичной длины неподвижен и находится в каком-то сечении балки; в какой-то момент времени, принимаемый обычно за нулевой момент, температурное поле предельного состояния, связанное с источником, пересекает этот участок, вызывая при этом различные температурные ситуации, вплоть до полного выравнивания температуры по ширине участка балки и последующего охлаждения до исходной температуры;
- температурное поле зафиксировано, а различное положение выделенного участка балки позади источника определяет разные моменты времени выравнивания температуры по ширине участка балки.

Оба этих подхода равнозначны. В нашем случае второй подход более удобен.

Рассмотрим малый момент времени t^* , когда выделенный участок балки пересекает область 1 в ее самом широком месте: это положение участка балки и зафиксировано на рис. 16.5, а. Распределение температуры $T(y, t^*)$ в момент t^* в его сечении показано на рис. 16.5, в, с выделением областей 1, 2, 3. В соответствии с этим распределением температур участок балки в поперечном направлении должен изменить свою ширину, но это свободное расширение невозможно, так как он находится в условиях жесткого закрепления по торцам участка за счет подковообразного холодного контура (область 3 – сечения kk и ll зафиксированы). В то же время удлинение призм области 2 в поперечном направлении должно быть реализовано, так как металл этих призм не потерял упругих свойств. И это стремление призм области 2 удлиниться реализуется смещением сечений mm и nn внутрь к оси шва (сечения $m'm'$ и $n'n'$), причем без возникновения силовой ситуации, за счет пластического обжатия в поперечном

направлении призм области 1, металл которых находится в разупрочненном состоянии (рис. 16.5, з).

В последующие моменты времени при рассмотрении положения участка балки за пределами области 1, когда металлу участка по всей ширине вернулись упругие свойства, то, что происходит в призмах, не представляет интереса. Происходят свободные температурные изменения линейных размеров призм в поперечном направлении. Можно сразу перейти ко времени полного охлаждения участка балки $t \rightarrow \infty$, при нашем подходе находящегося далеко позади источника.

Поскольку пластические деформации необратимы, призмы области 1 не восстанавливают при полном охлаждении свои исходные размеры, они так и остаются обжатыми. В районе этих призм наблюдается выпучивание металла, а призмы областей 2 и 3 восстанавливают свои исходные размеры, в результате чего ширина выделенного участка балки становится меньше на величину ΔB (рис. 16.5, д).

Если же говорить о ширине всей балки по длине, то после сварки она становится меньше также на величину ΔB .

Определение объема поперечного укорочения сварного соединения

Приближенную количественную оценку поперечных сварочных деформаций выполним при следующем предположении: величина пластической деформации сжатия в поперечном направлении, соответствующая перемещению границ mm и nn внутрь области 1 в момент t^* (см. рис. 16.5, з), равняется по величине, но с обратным знаком, возможному расширению участка балки в поперечном направлении $\Delta B'$, если бы этот участок был свободен:

$$\Delta B = -\Delta B'. \quad (16.14)$$

Определим величину $\Delta B'$ только от теплового расширения элементарных призм в поперечном направлении в момент t^* , когда температурное изменение по ширине участка балки соответствует температурной кривой $T(y, t^*)$ (см. рис. 16.5, в). Свободное удлинение элементарной призмы в поперечном направлении равно $\varepsilon_y^T dy = \alpha T(y, t^*) dy$, где $T(y, t^*)$ – температура призмы в момент t^* . Полное тепловое расширение участка балки

$$\Delta B' = \int_{-\frac{B}{2}}^{+\frac{B}{2}} \alpha T(y, t^*) dy = \alpha \int_{-\frac{B}{2}}^{+\frac{B}{2}} T(y, t^*) dy. \quad (16.15)$$

Интеграл в формуле (16.15), равный по величине площади, ограниченной температурной кривой $T(y, t^*)$ в момент t^* (см. рис. 16.5, в), определим, исходя из следующих соображений. В участок балки единичной длины при прохождении через него сварочной дуги вводится количество теплоты $Q = q_{II} \cdot 1$ [Дж]. Объем участка балки $V = Bs \cdot 1$ [см³]. Следовательно, повышение температуры объема участка, согласно формуле (13.5):

$$\Delta T = \frac{Q}{c\rho V} = \frac{q_{II}}{c\rho Bs}. \quad (16.16)$$

С другой стороны, это среднее повышение температуры участка балки выражается формулой

$$\Delta T = \frac{1}{B} \int_{-\frac{B}{2}}^{+\frac{B}{2}} T(y, t^*) dy. \quad (16.17)$$

Сопоставляя формулы (16.16) и (16.17), получаем

$$\int_{-\frac{B}{2}}^{+\frac{B}{2}} T(y, t^*) dy = \frac{q_{II}}{c\rho s}. \quad (16.18)$$

Подставив (16.18) в (16.15), имеем

$$\Delta B' = \frac{\alpha}{c\rho} \frac{q_{II}}{s}. \quad (16.19)$$

Изменение же ширины выделенного участка балки, учитывая предположение (16.14), будет

$$\Delta B = -\frac{\alpha}{c\rho} \frac{q_{II}}{s}. \quad (16.20)$$

Как уже отмечалось, изменение ширины участка балки обусловлено изменением его объема в поперечном направлении. Учитывая, что

площадь сечения участка балки в том же направлении равна $s \cdot 1$ [см²], определим изменение этого объема:

$$\Delta v_y = -\frac{\alpha}{c\rho} q_{II}, \quad (16.21)$$

где Δv_y – объем остаточных поперечных пластических деформаций, приходящийся на единицу длины шва, или просто объем поперечного укорочения, см².

Учитывая физическое сходство полученной формулы (16.21) с формулой для оценки объема продольного укорочения (16.8), введем понятие коэффициента поперечного укорочения сварного соединения μ_y , т. е.

$$\Delta v_y = \mu_y \frac{\alpha}{c\rho} q_{II}. \quad (16.22)$$

При более полном рассмотрении процесса в поперечном направлении, т. е. с учетом влияния процессов, идущих в продольном направлении, уточненное значение коэффициента поперечного укорочения, по данным К. М. Гатовского, выражается зависимостью

$$\mu_y = -(-1.4 + 0.5\mu_x). \quad (16.23)$$

Принимая значение коэффициента продольного укорочения сварного соединения $\mu_x = -0.335K_r K_s K_x = -0.3$, получим уточненное значение коэффициента поперечного укорочения $\mu_y = -1.25$.

Сравнивая формулы (16.8) и (16.22), определяющие объемы продольного и поперечного укорочений сварочного соединения, видим их физическое сходство. Действительно, они пропорциональны погонной энергии сварки и обобщенному параметру $\frac{\alpha}{c\rho}$, характеризующему способность металла изменять свой объем при нагреве. Однако, и это следует отметить, значения коэффициентов μ_x и μ_y существенно отличаются друг от друга.

Уточненное значение коэффициента поперечного укорочения $\mu_y = -1.25$ является максимальным. В действительности предположение о полном прогреве металла по толщине оправдывается не так часто. А неравномерный прогрев по толщине может быть причиной не только уменьшения пластического обжатия металла, но и возникновения угловых деформаций, что обусловлено неодинаковыми по

толщине пластическими деформациями металла в поперечном направлении. Очень часто, особенно в судовых конструкциях, наличие различных связей, препятствующих смещению металла к оси шва (например, ребер жесткости, пересекающих шов), также может приводить к уменьшению пластического обжатия металла. Перечисленные факторы уменьшают величину объема поперечного укорочения. Поэтому в инженерных расчетах для приближенной оценки коэффициента поперечного укорочения рекомендуется использовать эмпирическую формулу, предложенную С. А. Кузьминовым:

$$\mu_y = -1,25 \left[0,25 + 0,75 K_{np} (0,1 + 0,9 K_p) \right], \quad (16.24)$$

где K_{np} – коэффициент, учитывающий степень прогрева свариваемых элементов по толщине. Он определяется по графику (рис. 16.6, а) в зависимости от параметра $\frac{q_n}{s^2}$; K_p – коэффициент, учитывающий степень раскрепления сварного соединения пересекающими его ребрами. Он определяется по графику (рис. 16.6, б) в зависимости от относительного расстояния γ между приваренными ребрами, пересекающими сварное соединение (рис. 16.6, в).

С этой же целью, для приближенного определения μ_y с учетом глубины проплавления и влияния раскрепляющего ребра жесткости, можно рекомендовать зависимость, предложенную В. А. Винокуровым и А. Г. Григорьянцем:

$$\mu_y = 0,15 \frac{d}{B} + A \frac{B-d}{B}, \quad (16.25)$$

где A – коэффициент поперечного укорочения сварного соединения при отсутствии ребра жесткости, характеризующий влияние глубины проплавления; определяется по графикам рис. 16.7 в зависимости от удельной погонной энергии сварки $\frac{q_n}{s}$ для ряда значений q_n ; B – ширина полки (длина поперечного шва);

$$d = \begin{cases} s_i + k & \text{при одностороннем пояском шве} \\ (s_i - \text{толщина стенки, } k - \text{катет шва}); \\ s_i + 2k & \text{при двухстороннем пояском шве.} \end{cases}$$

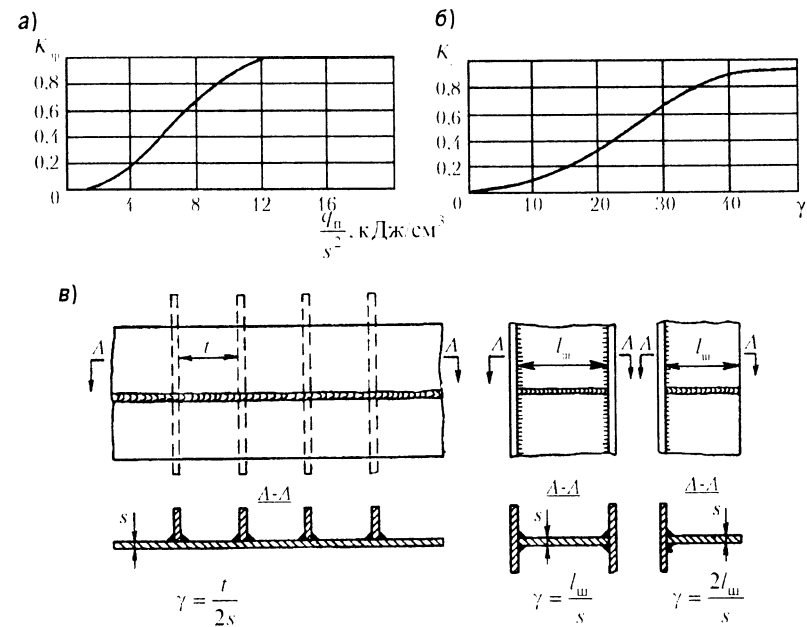


Рис. 16.6. Графики для определения коэффициентов K_{np} и K_p :

а – зависимость коэффициента K_{np} от удельной погонной энергии сварки;

б – зависимость коэффициента K от параметра γ ;

в – определение параметра γ

16.4. ОБРАЗОВАНИЕ УГЛОВЫХ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Угловые сварочные деформации являются, по существу, разновидностью поперечных деформаций. Как отмечалось в подразд. 16.3, неравномерный прогрев металла по толщине в зоне сварного соединения обуславливает неодинаковые по толщине пластические деформации металла в поперечном направлении, что, соответственно, уменьшает не только величину пластического обжатия металла, но и, в свою очередь, является причиной образования угловых деформаций.

В момент t^* (см. рис. 16.5, в) происходит бесшлювое пластическое обжатие металла области 1. Только в рассматриваемом случае неравномерного

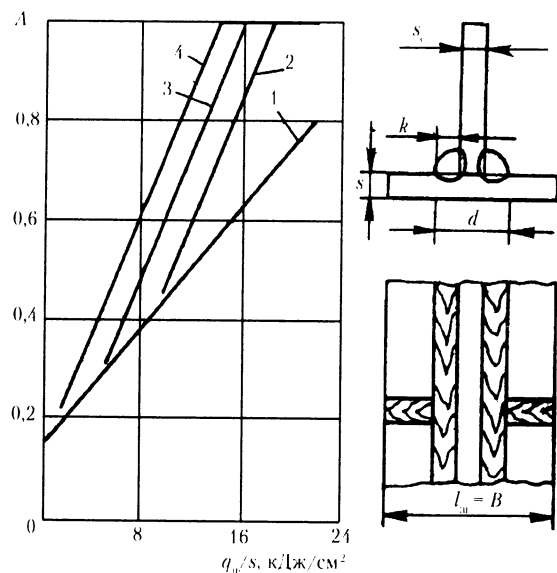


Рис. 16.7. Определение коэффициента A , характеризующего влияние глубины проплавления на величину поперечного укорочения сварного соединения:

1 – для случая сварки под флюсом ($q_n = 10...22$ кДж/см);
 2-1 – для случая сварки в среде CO_2 ($q_n = 14$; 11: 8,65 кДж/см соответственно)

нагрева по толщине (рис. 16.8) пластическое обжатие металла в поперечном направлении в верхних слоях будет больше, чем в нижних, что обусловит не только перемещение сечений mm и nn внутрь области 1, но и некоторый их поворот, характеризуемый углом β .

Поскольку после полного охлаждения все элементы, которые не нагревались выше T^* , должны вернуться к исходной форме прямоугольников, кроме элементов участка области 1, происходит поворот плоских элементов балки-полоски, характеризуемый тем же углом β .

Аналитически оценить величину угловых деформаций, обусловленных неравномерным прогревом металла по толщине, крайне затруднительно, так как расчетная оценка действительной температурной ситуации в области металла, близкой к источнику, очень сложна.

В практических расчетах угловые деформации β рекомендуется определять по эмпирическим зависимостям, предложенным С. А. Кузьминовым (рис. 16.9). Эти зависимости β от $\frac{q_n}{s^2}$ и τ справедливы для случаев как

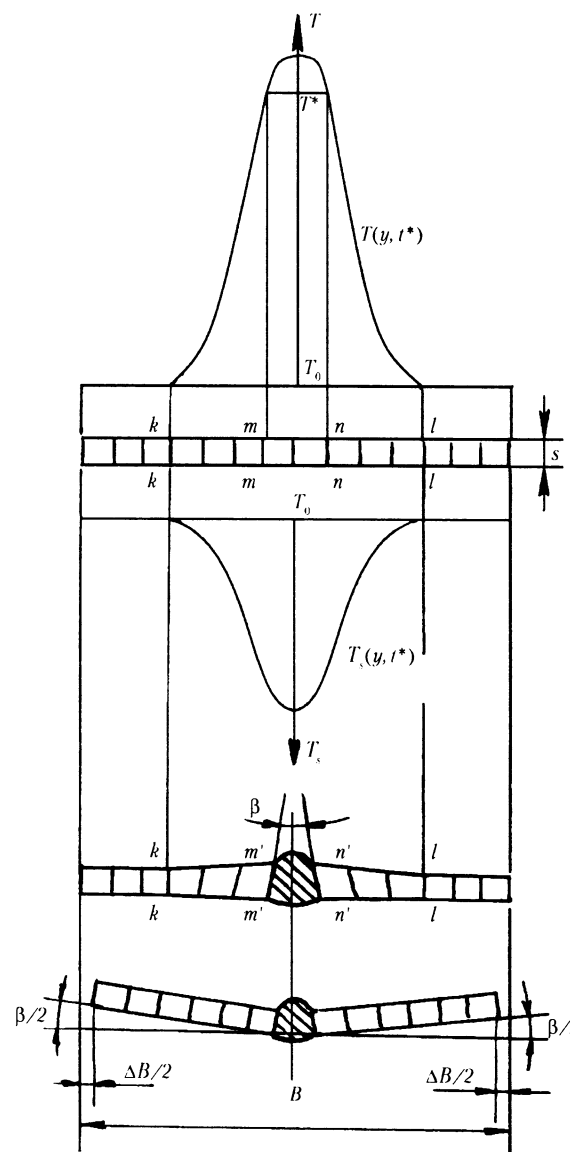


Рис. 16.8. Образование угловых сварочных деформаций, обусловленных неравномерным прогревом свариваемых элементов по толщине

сквозного, так и несквозного прогрева по толщине, когда зона пластических деформаций охватывает не всю толщину свариваемых элементов.

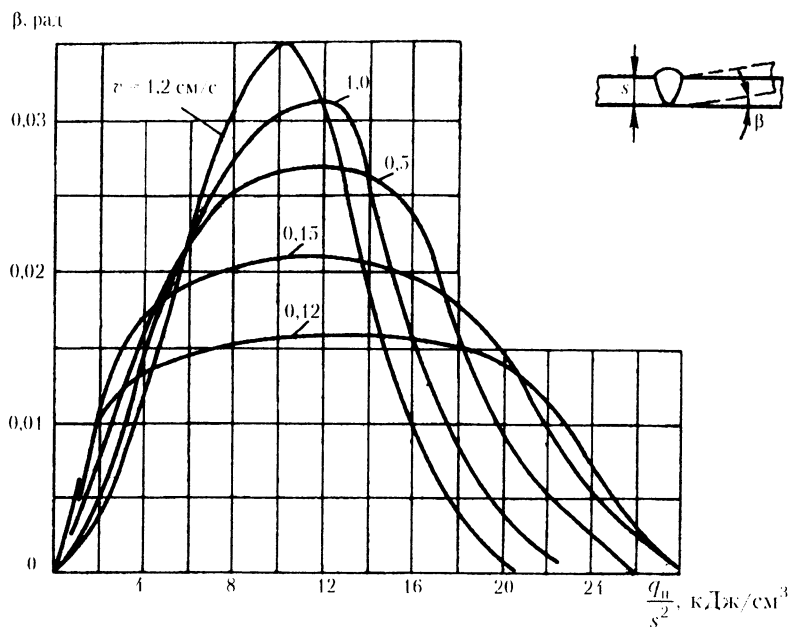


Рис. 16.9. Графики для определения угловых деформаций β от удельной погонной энергии сварки $\frac{q_n}{s^2}$ и скорости сварки v

Угловые деформации могут быть обусловлены и другой причиной, связанной с неравномерным сокращением металла шва в поперечном направлении по толщине при охлаждении (литевой усадкой), встречающейся при сварке элементов с разделкой кромок.

Например, при сварке листов толщиной s встык с разделкой кромок (θ – угол разделки) (рис. 16.10, а) угловая деформация β может быть определена из следующих соображений.

Ширина шва у верхней поверхности

$$B = 2s \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}$$

Укорочение верхнего слоя в поперечном направлении при охлаждении

$$\Delta B = \alpha T^* B = 2\alpha T^* s \operatorname{tg} \frac{\theta}{2},$$

где T^* – температура, при которой металл восстанавливает свои упругие свойства. Полагая, что у нижней поверхности поперечное укорочение пренебрежимо мало, получаем

$$\beta = \frac{\Delta B}{s} = 2\alpha T^* \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}. \quad (16.26)$$

В частности, угловые швы тавровых соединений без разделки кромок свариваемых элементов ассоциируются с выполнением швов в разделку 90° , для которых $\beta = 2\alpha T^* \approx 0,02$ рад.

В качестве более сложного примера на рис. 16.10, б показан фрагмент таврового соединения с односторонним угловым швом, для которого изменение угла между полкой и стенкой происходит вследствие двух причин: неравномерного нагрева полки и сокращения металла шва.

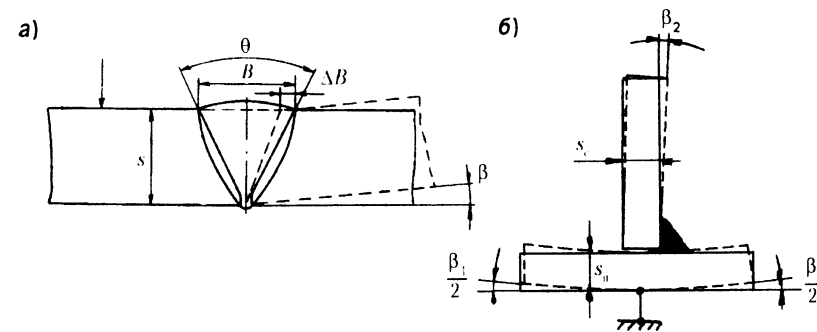


Рис. 16.10. Угловые деформации:

а – при сварке элементов встык с разделкой кромок;
б – при сварке тавровых соединений

Если считать нижнюю точку полки под стенкой жестко закрепленной, первая причина определит излом полки, характеризуемый углами справа и слева, равными $\frac{\beta_1}{2}$. Значение β_1 определяют по графику (см. рис. 16.9), где в параметр $\frac{q_n}{s^2}$ подставляется не полное значение погонной энергии

сварки, а только ее часть, идущая на нагрев полки: $q_{н.п} = q_{н} \frac{2s_{п}}{2s_{п} + s_c}$, а вместо $s - s_{п}$. Вторая причина обусловит поворот стенки в сторону углового шва на угол $\beta_2 \approx 0,02$ рад.

В случае двустороннего шва выполнение второго углового шва на той же погонной энергии, что и первого, обусловит увеличение излома полки в два раза за счет повторного неравномерного нагрева полки. А литейная усадка второго шва, которой препятствует металл первого шва, вызовет появление растягивающих напряжений в швах, которые обусловят:

- незначительный дополнительный прогиб (излом) полки, который можно определить по формуле

$$\beta_{\sigma} = 0,02 \left(\frac{k}{s_{п}} \right)^2, \quad (16.27)$$

где k – катет шва;

- незначительный поворот стенки в обратном направлении, но с углом β_2' значительно меньшим, чем угол β_2 . Этим наклоном можно пренебречь, считая $\beta_2' \approx 0$.

17. РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ В БАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Получение расчетных методик по определению общих сварочных деформаций балочных конструкций и рекомендаций по оценке уровня и распределения остаточных сварочных напряжений в них имеет большое значение в инженерной практике изготовления сварных конструкций.

Под продольными швами в балках следует понимать швы, параллельные оси балки, а под поперечными – швы, расположенные в плоскостях, перпендикулярных к оси балки.

17.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЩИХ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ОТ РЯДА ПРОДольНЫХ ШВОВ

Если балочная конструкция длиной L имеет n продольных швов, выполнение которых производится при неизменных геометрических характеристиках сечения балки по длине (например, балка предварительно собрана на жестких прихватках), то ее общие деформации определяются суммой деформаций, возникающих от каждого шва в отдельности. Используем общие формулы (15.26), заменив в них ΔV на ΔV_x :

$$\left. \begin{aligned} \Delta L_0 &= \Delta L_{0_1} + \Delta L_{0_2} + \dots + \Delta L_{0_n} = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^n \Delta V_{x_i}; \\ \varphi_Y &= \varphi_{Y_1} + \varphi_{Y_2} + \dots + \varphi_{Y_n} = \frac{1}{J_Y} \sum_{i=1}^n \Delta V_{x_i} z_{c_i}; \\ \varphi_Z &= \varphi_{Z_1} + \varphi_{Z_2} + \dots + \varphi_{Z_n} = \frac{1}{J_Z} \sum_{i=1}^n \Delta V_{x_i} y_{c_i}; \\ f_Z \left(\frac{L}{2} \right) &= \frac{\varphi_Y L}{8}; \\ f_Y \left(\frac{L}{2} \right) &= \frac{\varphi_Z L}{8}, \end{aligned} \right\} \quad (17.1)$$

где ΔV_{i_1} – объем продольного укорочения на всю длину i -го продольного шва, длина шва обычно равна длине балки L ; z и y_i – координаты центра тяжести объема продольного укорочения i -го шва; F , J_1 , J_2 – площадь и моменты инерции сечения балочной конструкции.

При приближенных расчетах можно пренебречь влиянием начального напряженного состояния, вызываемого наложением предшествующих швов. Однако при более точных расчетах это влияние может быть учтено (см. подразд. 16.2).

Следует обратить внимание на наличие близкорасположенных продольных швов. Если шов накладывают вблизи от ранее выполненного шва так, что образуемая им пластическая зона частично перекрывает пластическую зону, возникаемую от предыдущего шва, то объем продольного укорочения от последующего шва увеличивает объем продольного укорочения от предыдущего шва лишь настолько, насколько он увеличивает зону пластических деформаций (рис. 17.1, а). Это обусловлено тем, что в зоне перекрытия пластических зон при повторном нагреве от последующего шва процесс образования продольных сварочных деформаций и напряжений качественно и количественно аналогичен процессу от предыдущего нагрева, так как оба процесса сопровождаются развитием упругих и пластических деформаций разных знаков. В этом случае удобно выразить объем продольного укорочения сварного соединения $\Delta V_{1,2}$, включающего оба шва, через объем продольного укорочения предыдущего шва ΔV_{i_1} , назовем его первым:

$$\Delta V_{1,2} = \Delta V_{i_1} K_{ii} \quad (17.2)$$

где K_{ii} – коэффициент перекрытия пластических зон. Как видно из рис. 17.1, а, он может быть определен по формуле

$$K_{ii} = \frac{F_{s_{1,2}}}{F_{s_1}} = \frac{F_{s_1} + (d - b_{s1} + b_{s2})s}{F_{s_1}} \quad (17.3)$$

где $F_{s_{1,2}}$ – площадь пластической зоны сварного соединения, включающего оба шва; F_{s_1} – площадь пластической зоны от первого шва; d – расстояние между осями швов; b_{s1} , b_{s2} – полуширина пластических зон, соответственно от первого и второго швов (расчетное определение F_{s_1} и b_{s1} рассматривается в следующем подразделе).

Полученной формулой следует пользоваться только при условии $d < b_{s1} + b_{s2}$.

В реальных сварных конструкциях встречаются следующие варианты близкорасположенных продольных швов:

- многопроходные швы, например двусторонняя сварка листов автоматными швами (рис. 17.1, б), обычно погонная энергия сварки второго шва больше, чем первого: $q_{ii2} > q_{ii1}$, в этом случае ($d = 0$):

$$\Delta V_{1,2} = \Delta V_{i_2} \quad (17.4)$$

- двусторонние угловые швы, например сварка тавровых балок, приварка набора к полотнищу (рис. 17.1, в). В этих случаях обычно угловые швы выполняют на одинаковых погонных энергиях сварки: $q_{ii2} = q_{ii1}$; ($d = s_c + k$):

$$K_{ii} = 1 + \frac{(s_c + k)s_{ii}}{F_{s_1}} \quad (17.5)$$

где k – катет шва; s_c , s_{ii} – толщины стенки и полки тавра.

При сварке тавровых соединений малых и средних толщин $K_{ii} = 1,15 \dots 1,25$, поэтому в практических расчетах обычно берут значение $K_{ii} = 1,2$:

$$\Delta V_{1,2} = 1,2 \Delta V_{i_1} \quad (17.6)$$

Следует заметить: наличие близкорасположенных швов предполагает, что швы выполняются последовательно и каждый последующий шов накладывается после полного охлаждения предыдущего.

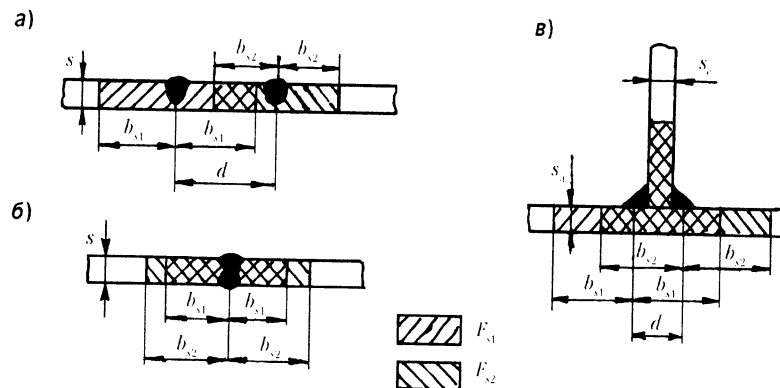


Рис. 17.1. Определение суммарного объема продольного укорочения в случае близкорасположенных швов:

а – два близкорасположенных продольных шва; б – двусторонний стыковой шов;
 в – двусторонний шов таврового соединения

17.2. ПРИБЛИЖЕННОЕ ПОСТРОЕНИЕ ЭПЮР ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ ОТ ПРОДОЛЬНОГО ШВА

При решении ряда вопросов возникает необходимость знать величину и распределение остаточных сварочных напряжений, в частности, при проверке устойчивости отдельных элементов сварной конструкции, оценке работоспособности сварных соединений и в некоторых других случаях.

На рис. 17.2, б показано распределение остаточных продольных напряжений в стыковом соединении.

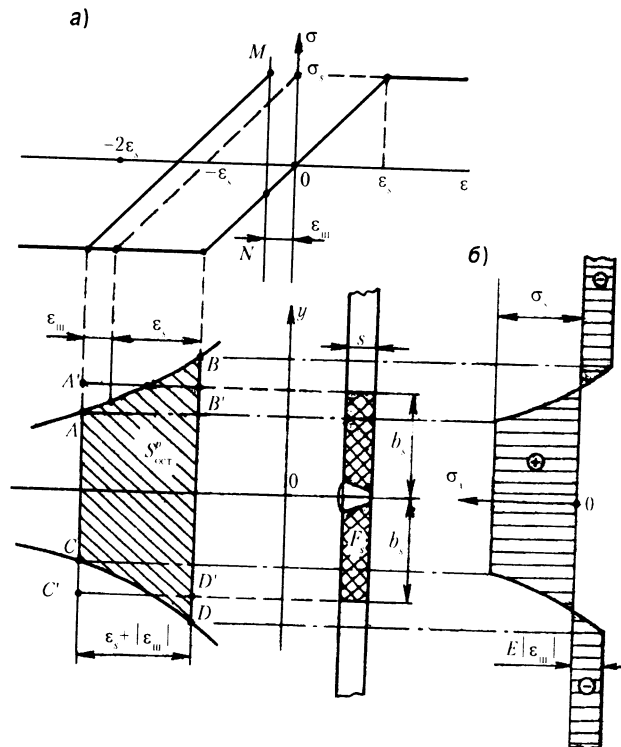


Рис. 17.2. Определение площади и ширины зоны продольных пластических деформаций:

а – определение площади пластических деформаций;
б – эпюра остаточных продольных напряжений

Однако обычно строят упрощенные эпюры остаточных напряжений, исходя из следующих соображений. Эпюры остаточных продольных пластических деформаций представляют собой площадь криволинейной трапеции $ABDC$ (рис. 17.2, а). Величина остаточных продольных пластических деформаций равна $(|\epsilon_{ш}| + \epsilon_s)$, а вне этой зоны падает до нуля. Поэтому действительную эпюру остаточных продольных пластических деформаций (площадь $ABDC$) можно заменить равновеликой площадью прямоугольника (площадь $A'B'D'C'$). Тогда площадь зоны распределения остаточных пластических деформаций F_s можно определить из выражения для объема продольного укорочения сварного соединения. Действительно, с учетом выражения для объема продольного укорочения можно записать

$$\Delta \tau_x = \int_F \epsilon_x^p dF = -(|\epsilon_{ш}| + \epsilon_s) F_s, \quad (17.7)$$

откуда

$$F_s = \frac{|\Delta \tau_x|}{|\epsilon_{ш}| + \epsilon_s}. \quad (17.8)$$

Если площадь поперечного сечения балки значительна, что примерно для реальных балок, то $|\epsilon_{ш}| \ll \epsilon_s$ и левой частью знаменателя можно пренебречь. Тогда площадь пластической зоны может быть определена с учетом выражения (16.13) по формуле

$$F_s = 0,335 K_T K_\sigma K_s \frac{\alpha q_{ш}}{\sigma_p \epsilon_s}. \quad (17.9)$$

Учитывая, что ширина пластической зоны практически одинакова в каждом из элементов, сходящихся у шва, можно записать

$$b_s = \frac{F_s}{\sum s}, \quad (17.10)$$

где $\sum s$ – сумма толщин свариваемых элементов у шва.

При этом $\sum s$ равна:

s – при наплавке валика на кромку (рис. 17.3, а);

$2s$ – при сварке встык элементов равных толщин (рис. 17.3, б);

$s_1 + s_2$ – при сварке встык элементов разных толщин (рис. 17.3, в);

$s_p + 2s_{ш}$ – при сварке таврового соединения (рис. 17.3, г).

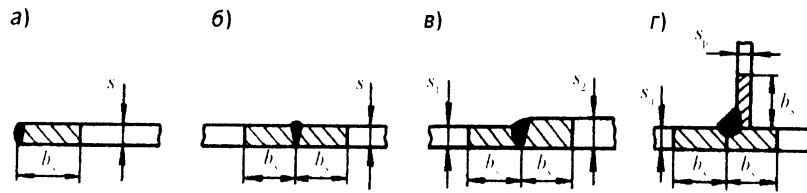


Рис. 17.3. Определение ширины зоны продольных пластических деформаций:

- a* – при наплавке валика на кромку;
- b* – при сварке веток элементов равных толщин;
- в* – при сварке веток элементов разных толщин;
- г* – при сварке таврового соединения

На рис. 17.4 показаны упрощенные эпюры остаточных деформаций и напряжений, которые возникают в поперечном сечении элементов от продольных швов. Построение эпюр выполняют следующим образом. В определенном масштабе изображают ширину элемента и ширину пластической зоны в районе шва. Затем проводят линию *ab*, характеризующую действительные деформации ϵ_y . Эту линию удобно проводить через точки θ' и θ'' , характеризующие деформации $\epsilon_0 = \frac{\Delta r_s}{F}$ и $\epsilon_m = \epsilon_0 + c_y z_m + c_z y_m$. В пределах пластической зоны параллельно линии *ab* и на расстоянии ϵ_y от нее проводят прямую *cd*, которая характеризует остаточные пластические деформации. Упругие деформации (на рис. 17.3 заштрихованы) вне пластической зоны соответствуют действительным деформациям, а в пластической зоне равны ϵ_y . Эпюра напряжений повторяет в измененном масштабе эпюру упругих деформаций.

17.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЩИХ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ОТ РЯДА ПОПЕРЕЧНЫХ ШВОВ

В отличие от продольных швов поперечные вызывают сосредоточенные по длине балки деформации металла. Длина участка балки, в пределах которого возникают упругопластические деформации от поперечного шва, соизмерима с шириной пластической зоны. Такое сосредоточение деформаций приводит к значительной кривизне оси балки на небольшой ее длине с образованием угла ϕ и местному укорочению длины этого участка балки на величину ΔL_0 . Поскольку вне этого участка деформации отсутствуют, угол поворота одного конца балки относительно другого остается равным ϕ , так

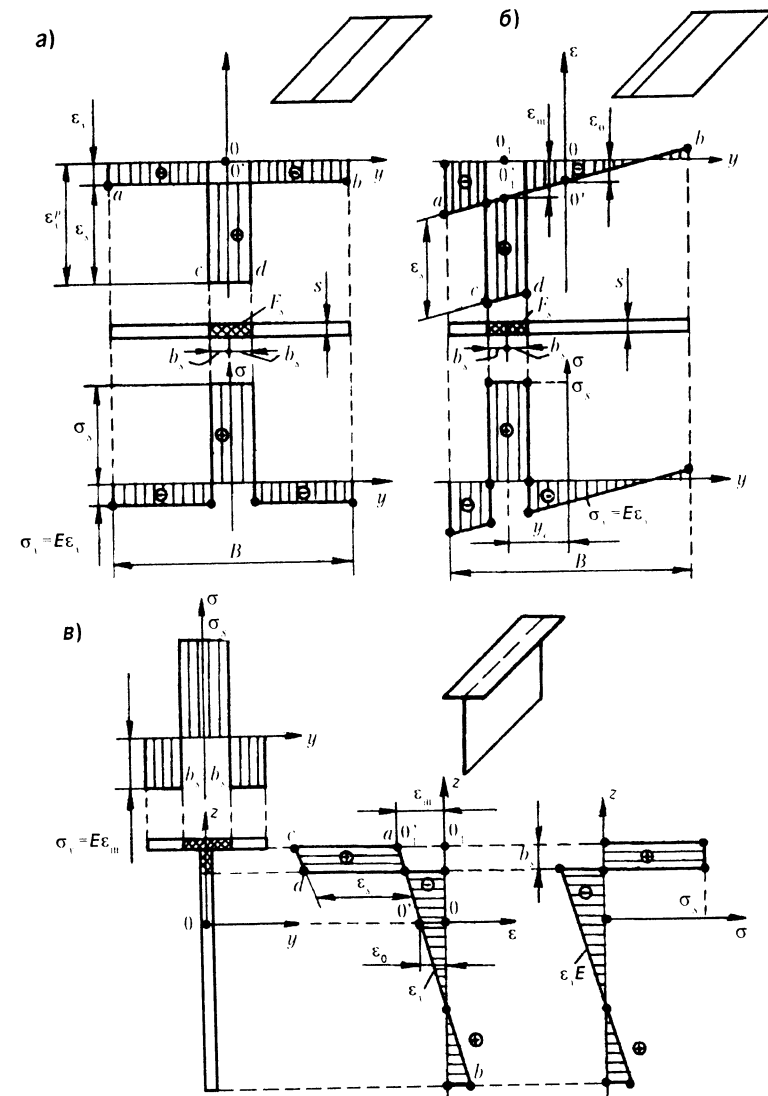


Рис. 17.4. Эпюры остаточных продольных деформаций и напряжений от продольных швов:

- a* – при сварке плоских элементов равной ширины;
- b* – при сварке плоских элементов разной ширины;
- в* – при сварке балки таврового сечения

же как и общее укорочение оси балки ΔL_0 . Укорочение оси балки и углы поворота ее концов определяют по общим формулам (15.26), заменив в них ΔV на ΔV_y .

Если балочная конструкция длиной L имеет m поперечных швов, выполнение которых производится при неизменных геометрических характеристиках сечения балки по длине, то ее общие деформации определяются суммой деформаций, возникающих от каждого шва в отдельности:

$$\left. \begin{aligned} \Delta L_0 &= \Delta L_{0_1} + \Delta L_{0_2} + \dots + \Delta L_{0_m} = \frac{1}{F} \sum_{j=1}^m \Delta V_{y_j}; \\ \varphi_Y &= \varphi_{Y_1} + \varphi_{Y_2} + \dots + \varphi_{Y_m} = \frac{1}{J_Y} \sum_{j=1}^m \Delta V_{y_j} z_{c_j}; \\ \varphi_Z &= \varphi_{Z_1} + \varphi_{Z_2} + \dots + \varphi_{Z_m} = \frac{1}{J_Z} \sum_{j=1}^m \Delta V_{y_j} y_{c_j}. \end{aligned} \right\} (17.11)$$

где ΔV_{y_j} – объем поперечного укорочения сварного соединения на всю длину шва, образуемый j -м поперечным швом; z_{c_j} и y_{c_j} – координаты центра тяжести объема поперечного укорочения j -го шва.

Поскольку процесс образования поперечных сварочных деформаций связан с пластическим деформированием металла, обусловленным пластическими деформациями одного знака (сжатия), то на объем поперечного укорочения не оказывает влияние перекрытие пластических зон близкорасположенных швов (в отличие от объемов продольных укорочений). Поэтому следует суммировать объемы поперечных укорочений от всех поперечных швов, независимо от их расположения.

Один поперечный шов вызывает локальный изгиб оси балки, при значительном же числе поперечных швов (более трех) кривизну изогнутой оси балки, как правило, усредняют, считая ее постоянной по всей длине балки. Тогда, согласно (15.26), стрелки прогиба посередине длины балки равны:

$$f_Z \left(\frac{L}{2} \right) = \frac{\varphi_Y L}{8}; f_Y \left(\frac{L}{2} \right) = \frac{\varphi_Z L}{8}. \quad (17.12)$$

Учитывая одинаковую структуру формул (17.1) и (17.11) с (17.12), их можно обобщить, представив, что в балочной конструкции присутствуют как продольные, так и поперечные швы.

17.4. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЩИХ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В БАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Если балочная конструкция длиной L имеет n продольных и m поперечных швов, выполнение которых производится при неизменных геометрических характеристиках сечения балки по длине, то определение общих сварочных деформаций конструкций балочного типа следует производить в следующем порядке.

1. Определяют геометрические характеристики сечения балочной конструкции: F – площадь поперечного сечения, см²; положение центра тяжести сечения; J_Y и J_Z – моменты инерции сечения относительно осей Y и Z соответственно.
2. Определяют координаты центров тяжести пластических зон: y_{c_j} , z_{c_j} – от всех продольных швов, y_{c_j} , z_{c_j} – от всех поперечных швов.
3. Определяют объемы продольного укорочения от всех продольных швов

$$\Delta V_{x_j} = \mu_{x_j} \frac{\alpha}{\sigma_p} q_{п_j} l_{ш_j}. \quad (17.13)$$

Обратить внимание:

- на наличие близкорасположенных продольных швов;
- обычно $l_{ш_j} = L$ [см], но в случае прерывистых продольных швов $l_{ш_j} \neq L$.
- 4. Определяют объемы поперечного укорочения от всех поперечных швов

$$\Delta V_{y_j} = \mu_{y_j} \frac{\alpha}{\sigma_p} q_{п_j} l_{ш_j}. \quad (17.14)$$

Обратить внимание:

- следует ли уточнить значения коэффициентов поперечного укорочения для разных поперечных швов по формулам (16.24) или (16.25);
- все ли значение погонной энергии сварки j -го поперечного шва следует подставлять в расчетную формулу. Например, в тавровой балке предусмотрена установка ребер жесткости, которые привариваются к стенке и полке. Эти швы являются по отношению к оси балки поперечными. Шов приварки ребра жесткости к

полке является j -м поперечным швом, $q_{ш}$ – погонная энергия сварки j -го шва. В расчетную формулу следует подставить не все значение $q_{ш}$, а только часть погонной энергии сварки, идущую на нагрев металла полки: $q_{н.ш} = q_{ш} \frac{2s_{ш}}{2s_{ш} + s_{п}}$, где $s_{ш}$ и $s_{п}$ – соответственно толщины полки и ребра жесткости;

- в расчетную формулу подставлять $l_{ш}$ – длину j -го поперечного шва, а не длину балки.
5. Определяют общие сварочные деформации конструкции по формулам

$$\left. \begin{aligned} \Delta L_0 &= \frac{1}{F} \left(\sum_{i=1}^n \Delta V_{x_i} + \sum_{i=1}^m \Delta V_{y_i} \right); \\ \varphi_y &= \frac{1}{J_y} \left(\sum_{i=1}^n \Delta V_{x_i} z_{i,x} + \sum_{i=1}^m \Delta V_{y_i} z_{i,y} \right); \\ \varphi_z &= \frac{1}{J_z} \left(\sum_{i=1}^n \Delta V_{x_i} y_{i,x} + \sum_{i=1}^m \Delta V_{y_i} y_{i,y} \right); \\ f_z \left(\frac{L}{2} \right) &= \frac{\varphi_y L}{8}; \\ f_y \left(\frac{L}{2} \right) &= \frac{\varphi_z L}{8}; \\ \Delta L(y, z) &= \Delta L_0 + \varphi_y z + \varphi_z y. \end{aligned} \right\} \quad (17.15)$$

Последняя формула в (17.15) позволяет оценить изменение длины балочной конструкции в любой точке ее сечения с координатами y, z .

17.5. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ОБЩИХ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ БАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Расчетные формулы, по которым определяются общие сварочные деформации, содержат геометрические характеристики сечения балок

и тепловые характеристики нагрева свариваемых элементов. Эти характеристики рекомендуется находить в первую очередь и далее рассматривать их как исходные данные к расчету. Для того чтобы не повторять в каждом из приведенных ниже примеров вычисления указанных характеристик, приведем расчетные формулы, по которым они определены.

Геометрические характеристики сечения балочной конструкции.

1. Площадь сечения

$$F = \sum_{k=1}^n f_k. \quad (17.16)$$

2. Расстояние от оси сравнения, выбираемой произвольно, до центра тяжести сечения балочной конструкции

$$z_{ц.г} = \frac{\sum_{k=1}^n f_k z_k'}{\sum_{k=1}^n f_k}. \quad (17.17)$$

3. Момент инерции относительно нейтральной оси

$$J_y = \sum_{k=1}^n f_k z_k'^2 + \sum_{k=1}^n i_k - \left(\sum_{k=1}^n f_k \right) z_{ц.г}^2. \quad (17.18)$$

Здесь приняты следующие обозначения: f_k – площадь сечения k -го элемента; z_k' – расстояние от оси сравнения до центра тяжести k -го элемента; i_k – собственный момент инерции k -го элемента.

По формулам (17.16)–(17.18) расчет геометрических характеристик сечения балочной конструкции удобно вести в табличной форме.

Тепловые характеристики нагрева свариваемых элементов.

1. Погонная энергия сварки в зависимости от режима

$$q_{ш} = \frac{\eta_{ш} U^2}{v}. \quad (17.19)$$

2. Погонная энергия сварки в зависимости от катета углового шва [кДж/см]:

- ручная сварка

$$q_{ш} = 40k^2; \quad (17.20)$$

- автоматическая и полуавтоматическая сварка под флюсом

$$q_{\text{н}} = 30k^2; \quad (17.21)$$

- полуавтоматическая сварка в среде защитных газов

$$q_{\text{н}} = 20k^2, \quad (17.22)$$

где k – катет шва, см.

3. Погонная энергия сварки в зависимости от площади наплавки

$$q_{\text{н}} = 65,5F_{\text{н}}, \quad (17.23)$$

где $F_{\text{н}}$ – площадь наплавки, см².

Пример 1. Оценить ожидаемые общие сварочные деформации тавровой балки при возможных вариантах выполнения равнопрочного поясного шва.

Поясной шов, являющийся по отношению к оси балки продольным, может быть выполнен как односторонним с расчетным катетом k_1 , так и двусторонним с катетом k_2 ; условие равнопрочности $k_1 = 2k_2$. Причем, двусторонний шов может быть выполнен как отдельно (второй шов выполняется после охлаждения первого), так и одновременно с двух сторон (дуга в дугу). Поэтому для рассмотрения выделим три основных варианта выполнения поясного шва тавровой балки:

- 1) односторонний угловой шов с катетом k_1 – один продольный шов;
- 2) двусторонний угловой шов с отдельным выполнением швов с катетами k_2 – два продольных шва (близкорасположенных);
- 3) двусторонний угловой шов с одновременным их выполнением с катетами k_2 – один продольный шов с удвоенным тепловложением.

Для оценки ожидаемых общих сварочных деформаций тавровой балки по трем вариантам выполнения поясного шва воспользуемся формулами (17.1):

$$\left. \begin{aligned} \Delta L_0 &= \frac{1}{F} \sum_{i=1}^n \Delta V_{x_i}; \\ \varphi_Y &= \frac{1}{J_Y} \sum_{i=1}^n \Delta V_{x_i} z_{c_i}; \\ f_Z \left(\frac{L}{2} \right) &= \frac{\varphi_Y \cdot L}{8}. \end{aligned} \right\}$$

Из этих формул видно, что укорочение по нейтральной оси балки ΔL_0 , угол поворота торцов балки φ , и стрелка прогиба посередине длины балки $f_Z \left(\frac{L}{2} \right)$ прямо пропорциональны суммарному объему продольного укорочения, который будет различен для трех рассматриваемых вариантов. Учитывая, что погонная энергия сварки пропорциональна квадрату катета углового шва: $q_{\text{н}} = Ak^2$, определим эти суммарные объемы укорочений для трех вариантов:

$$1) \left(\sum_{i=1}^n \Delta V_{x_i} \right)_1 = \mu_x \frac{\alpha}{c_p} q_{\text{н}_1} L = \mu_x \frac{\alpha}{c_p} Ak_1^2 L;$$

$$2) \left(\sum_{i=1}^n \Delta V_{x_i} \right)_2 = \mu_x \frac{\alpha}{c_p} q_{\text{н}_2} K_{\text{н}} L = \mu_x \frac{\alpha}{c_p} A \left(\frac{k_1}{2} \right)^2 K_{\text{н}} L;$$

$$3) \left(\sum_{i=1}^n \Delta V_{x_i} \right)_3 = 2\mu_x \frac{\alpha}{c_p} q_{\text{н}_2} L = 2\mu_x \frac{\alpha}{c_p} A \left(\frac{k_1}{2} \right)^2 L.$$

Положив, что во всех вариантах выполнения поясного шва назначен один способ сварки, т. е. значение A для них одинаково, и взяв рекомендуемое значение коэффициента перекрытия пластических зон $K_{\text{н}} = 1,2$, получим соотношение

$$\left(\sum_{i=1}^n \Delta V_{x_i} \right)_1 : \left(\sum_{i=1}^n \Delta V_{x_i} \right)_2 : \left(\sum_{i=1}^n \Delta V_{x_i} \right)_3 = 1 : \frac{K_{\text{н}}}{4} : \frac{1}{2} = 1 : 0,3 : 0,5.$$

Таким образом будут соотноситься и ожидаемые общие сварочные деформации тавровой балки. Видно, что наибольшие геометрические искажения получаются для первого варианта выполнения поясного шва.

Пример 2. Оценить ожидаемые общие сварочные деформации несимметричной двутавровой балки при возможных вариантах ее изготовления.

Длина балки 12 м, материал – малоуглеродистая сталь – $\frac{\alpha}{c_p} = 3,5 \cdot 10^{-6}$ см³/Дж, сечение балки показано на рис. 17.5, а, поясные швы – двусторонние, каждый угловой шов выполняется на погонной энергии $q_{\text{н}} = 7500$ Дж/см.

Рассмотрим возможные варианты изготовления балки.

1-й вариант – изготовление за один технологический этап: двутавровая балка собирается на жестких прихватках полностью, после чего выполняются последовательно все угловые швы (рис. 17.5, б).

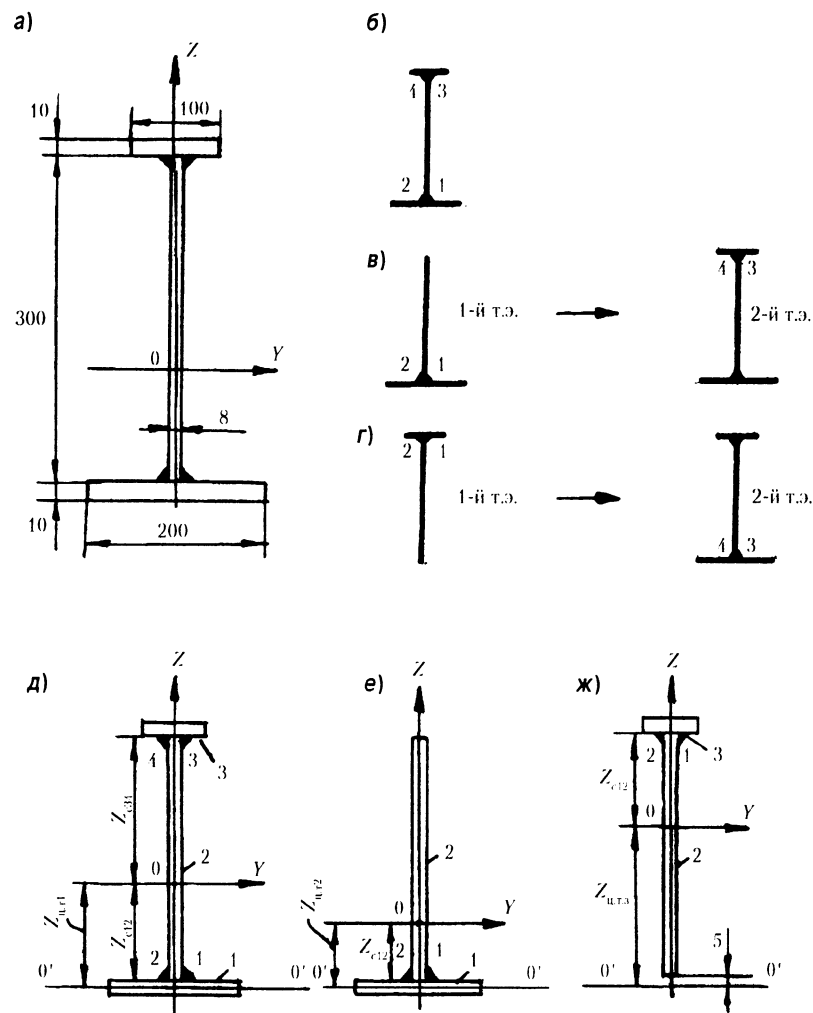


Рис. 17.5. Определение общих сварочных деформаций несимметричной двутавровой балки (пример 2):

a – сечение балки;
б – *г* – возможные варианты сборки и сварки балки;
д – *ж* – определение геометрических характеристик балок

Другие варианты – раздельный способ изготовления за два технологических этапа.

2-й вариант – 1-й технологический этап: стенка и нижняя полка собираются на жестких прихватках, далее выполняются последовательно угловые швы 1 и 2 (рис. 17.5, *в*); 2-й технологический этап: верхняя полка прижимается к стенке и фиксируется с помощью жестких прихваток, далее выполняются сварочные нагревы (швы 3 и 4);

3-й вариант – 1-й технологический этап: собирается и сваривается стенка с верхней полкой (рис. 17.5, *г*, швы 1 и 2); 2-й технологический этап: выставляется, фиксируется и приваривается нижняя полка (швы 3 и 4).

Предложенные три варианта сборки и сварки балки – три разные задачи, которые следует решать отдельно, при этом эффектом начального напряженного состояния для последующих швов пренебрегаем, так как расчеты носят оценочный характер.

Вначале проведем расчет потребных в дальнейшем геометрических характеристик сечений балок: ось сравнения $0'-0'$ проводим через центр тяжести нижней полки (рис. 17.5, *д-ж*), расчет ведем в табличной форме (табл. 17.1).

Таблица 17.1

К определению геометрических характеристик сечений балок

k	f_k , см ²	z_k , см	$f_k z_k$, см ³	$f_k z_k^2$, см ⁴	i_k , см ⁴
1	20	0	0	0	2
2	24	15,5	372	5766	1800
3	10	31	310	9610	1

Определяем геометрические характеристики двутавровой балки [формулы (17.16)–(17.18), рис. 17.5, *д*]:

$$F_1 = \sum_{k=1}^3 f_k = 54 \text{ см}^2;$$

$$z_{ц.т.1} = \frac{\sum_{k=1}^3 f_k z_k}{\sum_{k=1}^3 f_k} = \frac{682}{54} = 12,6 \text{ см};$$

$$J_{Y_1} = \sum_{k=1}^3 f_k z_k^2 + \sum_{k=1}^3 i_k - \left(\sum_{k=1}^3 f_k \right) z_{\text{ц.т.}}^2 =$$

$$= 15376 + 1803 - 54(12,6)^2 = 8606 \text{ см}^4.$$

Определяем геометрические характеристики тавровой балки (стенка с нижней полкой, рис. 17.5, е):

$$F_2 = \sum_{k=1}^2 f_k = 44 \text{ см}^2;$$

$$z_{\text{ц.т.}_2} = \frac{\sum_{k=1}^2 f_k z_k}{\sum_{k=1}^2 f_k} = \frac{372}{44} = 8,45 \text{ см};$$

$$J_{Y_2} = \sum_{k=1}^2 f_k z_k^2 + \sum_{k=1}^2 i_k - \left(\sum_{k=1}^2 f_k \right) z_{\text{ц.т.}}^2 =$$

$$= 5766 + 1802 - 44(8,45)^2 = 4426 \text{ см}^4.$$

Определяем геометрические характеристики тавровой балки (стенка с верхней полкой, рис. 17.5, ж):

$$F_3 = \sum_{k=2}^3 f_k = 34 \text{ см}^2;$$

$$z_{\text{ц.т.}_3} = \frac{\sum_{k=2}^3 f_k z_k}{\sum_{k=2}^3 f_k} = \frac{682}{34} = 20,06 \text{ см};$$

$$J_{Y_3} = \sum_{k=2}^3 f_k z_k^2 + \sum_{k=2}^3 i_k - \left(\sum_{k=2}^3 f_k \right) z_{\text{ц.т.}}^2 =$$

$$= 15376 + 1801 - 34(20,06)^2 = 3495 \text{ см}^4.$$

Далее определяем объемы укорочений соответственно от всех сварных швов. В балке их четыре, длина каждого равна длине балки, по отношению к оси балки они являются продольными, причем их следует разделить на две пары близкорасположенных продольных швов. Суммарный объем продольного укорочения от пары близкорасположенных швов (значение коэффициента перекрытия пластических зон берем рекомендуемое $K_{\text{п}} = 1,2$) будет равен [формула (17.13)]

$$\sum_{i=1}^2 \Delta V_{\Delta} = \Delta V_{\Delta_{12}} = \Delta V_{\Delta_{34}} = \Delta V_{\Delta} K_{\text{п}} = \mu_{\Delta} \frac{\alpha}{\sigma_D} q_{\text{п}} l_{\text{ш}} K_{\text{п}} =$$

$$= -0,335 \cdot 0,85 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6} \cdot 7500 \cdot 1200 \cdot 1,2 = -10,76 \text{ см}^3.$$

Здесь $\mu_{\Delta} = -0,335 K_r K_s K_{\sigma}$; $K_r = 0,85$; $K_s = 1$; $K_{\sigma} = 1$ (см. подразд. 16.2); $l_{\text{ш}} = L = 1200$ см.

Теперь проведем расчетную оценку ожидаемых общих сварочных деформаций балки по трем вариантам ее изготовления.

1-й вариант.

Последовательность выполнения сварных швов показана на рис. 17.5, б, координаты центров тяжести объемов продольных укорочений: $z_{\Delta_{12}} = -12,1$ см; $z_{\Delta_{34}} = 17,9$ см (см. рис. 17.5, д).

Укорочение по центральной оси

$$\Delta L_0 = \frac{1}{F_1} \sum_{i=1}^4 \Delta V_{\Delta_i} = \frac{2(-10,76)}{54} = -0,40 \text{ см}.$$

Угол поворота одного конца двутавра относительно другого

$$\varphi_Y = \frac{1}{J_{Y_1}} \sum_{i=1}^4 \Delta V_{\Delta_i} z_{\Delta_i} =$$

$$= \frac{(-10,76)(-12,1) + (-10,76) \cdot 17,9}{8606} = -7,25 \cdot 10^{-3}.$$

Стрелка прогиба посередине длины балки

$$f_Z \left(\frac{L}{2} \right) = \frac{\varphi_Y L}{8} = \frac{(-7,25 \cdot 10^{-3}) \cdot 1200}{8} = -1,09 \text{ см}.$$

2-й вариант.

1-й технологический этап (см. рис. 17.5, в), $z_{c_2} = -7,95$ см (см. рис. 17.5, е):

$$\Delta L_{0_1} = \frac{1}{F_2} \sum_{i=1}^2 \Delta V_{x_i} = \frac{-10,76}{44} = -0,244 \text{ см};$$

$$\varphi_{Y_1} = \frac{1}{J_{Y_2}} \sum_{i=1}^2 \Delta V_{x_i} z_{c_i} = \frac{(-10,76)(-7,95)}{4426} = 1,93 \cdot 10^{-2};$$

$$f_{z_1} \left(\frac{L}{2} \right) = \frac{\varphi_{Y_1} L}{8} = \frac{1,93 \cdot 10^{-2} \cdot 1200}{8} = 2,90 \text{ см.}$$

2-й технологический этап, $z_{c_{34}} = 17,9$ см:

$$\Delta L_{0_2} = \frac{1}{F_1} \sum_{i=3}^4 \Delta V_{x_i} = \frac{-10,76}{54} = -0,20 \text{ см};$$

$$\varphi_{Y_2} = \frac{1}{J_{Y_1}} \sum_{i=3}^4 \Delta V_{x_i} z_{c_i} = \frac{(-10,76) \cdot 17,9}{8606} = -2,24 \cdot 10^{-2};$$

$$f_{z_2} \left(\frac{L}{2} \right) = \frac{\varphi_{Y_2} L}{8} = \frac{(-2,24 \cdot 10^{-2}) \cdot 1200}{8} = -3,36 \text{ см.}$$

Просуммируем деформации, полученные на технологических этапах:

$$\Delta L_0 = \Delta L_{0_1} + \Delta L_{0_2} = -0,244 - 0,20 = -0,444 \text{ см};$$

$$\varphi_Y = \varphi_{Y_1} + \varphi_{Y_2} = 1,93 \cdot 10^{-2} + (-2,24 \cdot 10^{-2}) = -3,1 \cdot 10^{-3};$$

$$f_Z \left(\frac{L}{2} \right) = f_{z_1} \left(\frac{L}{2} \right) + f_{z_2} \left(\frac{L}{2} \right) = 2,90 + (-3,36) = -0,46 \text{ см.}$$

3-й вариант.

1-й технологический этап (см. рис. 17.5, з), $z_{c_{12}} = 10,44$ см (см. рис. 17.5, ж):

$$\Delta L_{0_1} = \frac{1}{F_3} \sum_{i=1}^2 \Delta V_{x_i} = \frac{-10,76}{34} = -0,316 \text{ см};$$

$$\varphi_{Y_1} = \frac{1}{J_{Y_2}} \sum_{i=1}^2 \Delta V_{x_i} z_{c_i} = \frac{(-10,76) \cdot 10,44}{3495} = -3,2 \cdot 10^{-2};$$

$$f_{z_1} \left(\frac{L}{2} \right) = \frac{\varphi_{Y_1} L}{8} = \frac{(-3,2 \cdot 10^{-2}) \cdot 1200}{8} = -4,8 \text{ см.}$$

2-й технологический этап, $z_{c_{34}} = -12,1$ см:

$$\Delta L_{0_2} = \frac{1}{F_1} \sum_{i=3}^4 \Delta V_{x_i} = \frac{-10,76}{54} = -0,20 \text{ см};$$

$$\varphi_{Y_2} = \frac{1}{J_{Y_1}} \sum_{i=3}^4 \Delta V_{x_i} z_{c_i} = \frac{(-10,76)(-12,1)}{8606} = 1,51 \cdot 10^{-2};$$

$$f_{z_2} \left(\frac{L}{2} \right) = \frac{\varphi_{Y_2} L}{8} = \frac{1,51 \cdot 10^{-2} \cdot 1200}{8} = 2,26 \text{ см.}$$

Просуммируем деформации, полученные на технологических этапах:

$$\Delta L_0 = \Delta L_{0_1} + \Delta L_{0_2} = -0,316 - 0,20 = -0,516 \text{ см};$$

$$\varphi_Y = \varphi_{Y_1} + \varphi_{Y_2} = -3,2 \cdot 10^{-2} + 1,51 \cdot 10^{-2} = -1,69 \cdot 10^{-2};$$

$$f_Z \left(\frac{L}{2} \right) = f_{z_1} \left(\frac{L}{2} \right) + f_{z_2} \left(\frac{L}{2} \right) = -4,8 + 2,26 = -2,54 \text{ см.}$$

Для наглядности представим полученные результаты в итоговой таблице (табл. 17.2).

Таблица 17.2

Результаты расчетов (пример 2)

Вариант	Укорочение по центральной оси ΔL_0 , см	Стрелка прогиба $f_Z \left(\frac{L}{2} \right)$, см
1	-0,40	-1,09
2	-0,444	-0,46
3	-0,516	-2,54

Анализируя полученные результаты, видим, что 3-й вариант изготовления балки, дающий наибольшие изгибные деформации, является нерациональным. Наименьшие изгибные деформации обеспечивает 2-й вариант, но, с точки зрения технологичности, более приемлем 1-й вариант изготовления: изгибные деформации несколько больше, чем во 2-м, но трудоемкость изготовления балки меньше (меньше подготовительных работ). При сопоставлении 2-го и 3-го вариантов напрашивается аналогия с изготовлением сложных конструкций из крупных узлов (блоков, секций), например: нижняя широкая полка – объемная днищевая секция, стенка – бортовые секции, верхняя узкая полка – палубная секция. Результаты расчетов позволяют дать некоторые рекомендации:

- следует начинать формирование сложной конструкции с наиболее металлоемкого узла;
- формирование конструкции вести так, чтобы последующие монтажные швы располагались как можно ближе к главным осям формирующейся конструкции (в 3-м варианте изготовления балки эти рекомендации нарушены).

Пример 3. Определить общие деформации балки фундамента, обусловленные продольными и поперечными швами. Геометрические характеристики сечения балки (рис. 17.6): $F=68 \text{ см}^2$; $J_y=12070 \text{ см}^4$; $J_z=903 \text{ см}^4$. Длина балки 6 м. Материал – низкоуглеродистая сталь. Погонная энергия сварки всех швов 14000 Дж/см. Балка предварительно полностью собрана на жестких прихватках.

Влиянием начального напряженного состояния пренебрегаем. Коэффициент перекрытия пластических зон двусторонних продольных швов $K_{II} = 1,2$. Характеристики швов приведены в табл. 17.3: 1–4 продольные – швы; 5–7 поперечные швы (от приварки шести ребер жесткости двусторонними угловыми швами).

1. Определяем объемы продольного укорочения сварных соединений от поясных швов 1–4 (две пары близкорасположенных швов) по формуле (17.13):

$$\begin{aligned} \Delta V_{x_{12}} = \Delta V_{x_{34}} &= \mu_{\lambda} \frac{\alpha}{c_p} q_{II} l_{III} K_{II} = \\ &= -0,335 \cdot 0,85 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6} \cdot 14000 \cdot 600 \cdot 1,2 = -10 \text{ см}^3. \end{aligned}$$

Здесь $\mu_{\lambda} = -0,335 K_T K_s K_{\sigma}$; $K_T = 0,85$; $K_s = 1$; $K_{\sigma} = 1$; $\frac{\alpha}{c_p} = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{Дж}$

$l_{III} = L = 600 \text{ см}$.

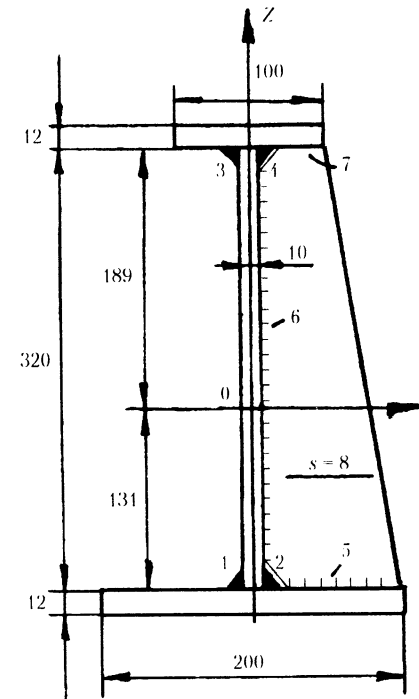


Рис. 17.6. Определение общих сварочных деформаций балки фундамента (пример 3)

Таблица 17.3

Характеристики сварных швов балки

Номер шва (по рис. 17.6)	Количество швов	Длина одного шва l_{III} , см	Координаты центра тяжести пластической зоны	
			y_c , см	z_c , см
1	1	600	0	-13,1
2	1	600	0	-13,1
3	1	600	0	18,9
4	1	600	0	18,9
5	12	8	6	-13,7
6	12	29	0	2,9
7	12	3	3,5	19,5

2. Вычисляем объемы поперечного укорочения сварных соединений от швов 5-7 по формуле (17.14):

$$\Delta V_{y_i} = \mu_{y_i} \frac{\alpha}{c_p} q_{ii} l_{ii};$$

• 5-й шов:
часть погонной энергии сварки, идущая на нагрев нижней полки:

$$q_{ii} = q_{ii.n} = q_{ii} \frac{2s_{ii}}{2s_{ii} + s_p} = 14000 \cdot \frac{2 \cdot 1,2}{2 \cdot 1,2 + 0,8} = 10500 \text{ Дж/см};$$

коэффициент поперечного укорочения сварного соединения

$$\begin{aligned} \mu_{y_5} &= -1,25 \left[0,25 + 0,75 K_{np} (0,1 + 0,9 K_p) \right] = \\ &= -1,25 \left[0,25 + 0,75 \cdot 0,56 (0,1 + 0,9 \cdot 0,16) \right] = -0,44, \end{aligned}$$

где $K_{np} = 0,56$ определен из графика (см. рис. 16.6, а) для $\frac{q_{ii.n}}{s_{ii}^2} = 7300 \text{ Дж/см}^2$;

$K_p = 0,16$ определен из графика (см. рис. 16.6, б) для $\gamma = \frac{2l_{ii}}{s_{ii}} = 13,3$:

$$\Delta V_{y_5} = -0,44 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6} \cdot 10500 \cdot 8 = -0,13 \text{ см}^3;$$

• 6-й шов:
часть погонной энергии сварки, идущая на нагрев стенки:

$$q_{ii} = q_{ii.c} = q_{ii} \frac{2s_c}{2s_c + s_p} = 14000 \cdot \frac{2 \cdot 1}{2 \cdot 1 + 0,8} = 10000 \text{ Дж/см};$$

коэффициент поперечного укорочения сварного соединения

$$\begin{aligned} \mu_{y_6} &= -1,25 \left[0,25 + 0,75 K_{np} (0,1 + 0,9 K_p) \right] = \\ &= -1,25 \left[0,25 + 0,75 \cdot 0,88 (0,1 + 0,9 \cdot 0,66) \right] = -0,88, \end{aligned}$$

где $K_{np} = 0,88$ определен из графика (см. рис. 16.6, а) для $\frac{q_{ii.c}}{s_c^2} = 10000 \text{ Дж/см}^2$;

$K_p = 0,66$ определен из графика (см. рис. 16.6, б) для $\gamma = \frac{l_{ii}}{s_c} = 29$:

$$\Delta V_{y_6} = -0,88 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6} \cdot 10000 \cdot 29 = -0,89 \text{ см}^3;$$

• 7-й шов:
часть погонной энергии сварки, идущая на нагрев верхней полки:

$$q_{ii} = q_{ii.n} = q_{ii} \frac{2s_{ii}}{2s_{ii} + s_p} = 14000 \cdot \frac{2 \cdot 1,2}{2 \cdot 1,2 + 0,8} = 10500 \text{ Дж/см};$$

коэффициент поперечного укорочения сварного соединения

$$\begin{aligned} \mu_{y_7} &= -1,25 \left[0,25 + 0,75 K_{np} (0,1 + 0,9 K_p) \right] = \\ &= -1,25 \left[0,25 + 0,75 \cdot 0,56 (0,1 + 0,9 \cdot 0,03) \right] = -0,38, \end{aligned}$$

где $K_{np} = 0,56$ определен из графика (см. рис. 16.6, а) для $\frac{q_{ii.n}}{s_{ii}^2} = 7300 \text{ Дж/см}^2$;

$K_p = 0,03$ определен из графика (см. рис. 16.6, б) для $\gamma = \frac{2l_{ii}}{s_{ii}} = 5$:

$$\Delta V_{y_7} = -0,38 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6} \cdot 10500 \cdot 3 = -0,042 \text{ см}^3.$$

3. Определяем общие сварочные деформации балки по формулам (17.15):

• укорочение по центральной оси

$$\begin{aligned} \Delta L_0 &= \frac{1}{F} \left(\sum_{i=1}^n \Delta V_{x_i} + \sum_{j=1}^m \Delta V_{y_j} \right) = \\ &= \frac{1}{68} \left[2(-10) + 12(-0,13 - 0,89 - 0,042) \right] = -0,48 \text{ см}; \end{aligned}$$

• угол поворота концов балки в вертикальной плоскости

$$\varphi_Y = \frac{1}{J_Y} \left(\sum_{i=1}^n \Delta V_{x_i} z_{c_i} + \sum_{j=1}^m \Delta V_{y_j} z_{c_j} \right) =$$

$$= \frac{1}{12070} [(-10)(-13,1) + (-10) \cdot 18,9 + 12(-0,13)(-13,7) + 12(-0,89) \cdot 2,9 + 12(-0,042) \cdot 19,5] = -6,4 \cdot 10^{-3};$$

- угол поворота концов балки в горизонтальной плоскости

$$\varphi_Z = \frac{1}{J_Z} \left(\sum_{i=1}^n \Delta V_{x_i} y_{c_i} + \sum_{j=1}^m \Delta V_{y_j} y_{c_j} \right) = \frac{1}{903} [12(-0,13) \cdot 6 + 12(-0,042) \cdot 3,5] = -1,23 \cdot 10^{-2};$$

- прогибы посередине длины балки в вертикальной и горизонтальной плоскостях

$$f_Z \left(\frac{L}{2} \right) = \frac{\varphi_Y L}{8} = \frac{(-6,4 \cdot 10^{-3}) \cdot 600}{8} = -0,48 \text{ см};$$

$$f_Y \left(\frac{L}{2} \right) = \frac{\varphi_Z L}{8} = \frac{(-1,23 \cdot 10^{-2}) \cdot 600}{8} = -0,92 \text{ см}.$$

Анализируя полученные результаты, видим, что балка фундамента после изготовления получила изгибные деформации в двух плоскостях, поэтому рассмотренный вариант изготовления балки наиболее технологичен.

17.6. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ОБЩИХ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Секции корпуса судна – это сложные сварные конструкции, различающиеся габаритами, конфигурацией, весом и степенью насыщенности элементами. С точки зрения особенностей их изготовления, секции удобно разделить на три условные группы:

- 1) плоскостные секции с относительно малой высотой набора, характеризующиеся небольшой жесткостью, например выгородки, палубные и бортовые секции и др.;

2) плоскостные секции с высоким набором, характеризующиеся большей жесткостью, например секции двойного и одинарного дна с флорами и стрингерами;

3) объемные секции с криволинейными очертаниями, характеризующиеся значительной жесткостью, например объемные днищевые секции, секции оконечностей и др.

Обычно секции изготавливают в условиях сборочно-сварочных цехов из готовых элементов: полотнищ, балок и определенного числа деталей, – направляемых на сборку россыпью. Более рационален отдельный метод сборки и сварки, позволяющий максимально использовать механизированные способы сварки. В то же время общие сварочные деформации неизбежны при любой последовательности сборки и сварки секций.

Поэтому количественная оценка ожидаемых общих сварочных деформаций конкретной секции необходима не только для выбора оптимального варианта ее изготовления, но и для решения о назначении специальных мероприятий, обеспечивающих требуемую точность изготовления секции.

Расчет общих сварочных деформаций секций сводят к расчету деформаций конструкций балочного типа. С этой целью секции первых двух групп расчленяют на составляющие балки, а секции третьей группы заменяют условной составляющей балкой.

Расчленение на составляющие балки производят следующим образом. В рассматриваемом направлении (продольном или поперечном) выделяют элемент набора с присоединенным пояском полотнища. Ширина присоединенного пояса назначается равной расстоянию между набором, если оно менее 50 толщин полотнища, и равной 50 толщинами, если имеет место обратное неравенство. В составляющую балку включают также примыкающие к ней части элементов перекрестного набора на ширине присоединенного пояса. Далее, согласно методике определения общих сварочных деформаций в балочных конструкциях (см. подразд. 17.4), определяют общие сварочные деформации составляющей балки. Если секция расчленяется на одинаковые составляющие балки, то ее деформации будут такими же, как и деформации одной составляющей балки. В противном случае определяют деформации нескольких составляющих балок, которые характеризуют деформации секции в соответствующих сечениях. При этом предполагается, что деформации одной составляющей балки не оказывают влияния на деформации соседних балок.

Указанное допущение оправдано для нежестких секций, для жестких же допущение о независимости деформаций составляющих балок, различных по сечению или по условиям выполнения процесса сварки, неприемлемо. Приближенное определение общих сварочных деформаций

таких секций осуществляется введением понятия об условной составляющей балке.

Для определения параметров жесткости условной балки секцию разбивают на составляющие балки. Для каждой из них определяют геометрические характеристики сечения, затем результаты усредняют, получая значения параметров жесткости условной балки: ее высота, площадь сечения, момент инерции и другие параметры равны средним арифметическим значениям от соответствующих величин составляющих балок. Далее определяют общие сварочные деформации условной балки по методике, изложенной в подразд. 17.4, и полагают, что эти значения деформаций характеризуют деформации секции в целом в рассматриваемом направлении.

Расчет деформаций секций (составляющих или условных балок) выполняют с учетом изменения параметров жесткости на отдельных технологических этапах. Общие деформации укорочения и изгиба секции определяют суммированием соответствующих величин, возникающих на каждом технологическом этапе ее изготовления.

Для того чтобы суммировать укорочения, полученные по центральным осям секции на отдельных этапах ее изготовления, необходимо произвести пересчет этих укорочений на укорочение по центральной оси готовой секции. Этот пересчет производится по формуле

$$\Delta L_0 = \Delta L_k + \varphi_Y z_k, \quad (17.24)$$

где ΔL_0 – укорочение секции (балки) по центральной оси готовой секции; ΔL_k – укорочение секции (балки) по центральной оси на k -м этапе; φ_Y – угол поворота концов секции (балки) на k -м этапе; z_k – расстояние между центральными осями готовой секции и не полностью собранной секции на k -м этапе.

Зная общее укорочение по центральной оси готовой секции и угол поворота ее концов, можно определить смещение любых ее точек. Например, определить укорочение готовой секции по полотнищу и стрелку ее прогиба посередине:

$$\Delta L_{11} = \Delta L_0 + \varphi_Y z_{11}; \quad (17.25)$$

$$f_Z \left(\frac{L}{2} \right) = \frac{\varphi_Y L}{8}, \quad (17.26)$$

где z_{11} – координата средней плоскости полотнища готовой секции.

Приближенная оценка общих сварочных деформаций корпуса судна также сводится к расчету деформаций балочной конструкции (эквив-

валентного бруса). Горизонтальное и вертикальное искривления корпуса судна, возникающие при его сборке и сварке на стапеле, могут быть оценены аналогично по формулам

$$f_Y = \frac{\varphi_{Z_0} L}{8}; \quad f_Z = \frac{\varphi_{Y_0} L}{8}, \quad (17.27)$$

где φ_{Z_0} и φ_{Y_0} – общие углы поворота одной оконечности судна по отношению к другой соответственно вокруг осей Z и Y ; L – длина корпуса судна.

Общий угол поворота оконечностей корпуса судна, возникающий в результате сварки монтажных швов на стапеле, равен сумме углов поворота, образующихся по мере формирования корпуса на различных этапах стапельной сборки и сварки:

$$\varphi_{Z_0} = \sum_1^k \varphi_{Z_i}; \quad \varphi_{Y_0} = \sum_1^k \varphi_{Y_i},$$

где k – количество технологических этапов на стапеле, каждый из которых характеризуется постоянной жесткостью конструкции.

В свою очередь, углы поворота одной части конструкции корпуса по отношению к другой от монтажных швов, выполняемых на данном технологическом этапе, могут быть определены по формулам (см. подразд. 17.4):

$$\varphi_{Z_i} = \frac{1}{J_{Z_i}} \left(\sum_{i=1}^n \Delta V_{x_i} y_c + \sum_{j=1}^m \Delta V_{y_j} y_c \right);$$

$$\varphi_{Y_i} = \frac{1}{J_{Y_i}} \left(\sum_{i=1}^n \Delta V_{x_i} z_c + \sum_{j=1}^m \Delta V_{y_j} z_c \right),$$

где J_{Z_i} , J_{Y_i} – моменты инерции сечения конструкции (корпуса судна или его части) на данном технологическом этапе; ΔV_{x_i} – объем продольного укорочения i -го монтажного сварного соединения, расположенного вдоль судна; ΔV_{y_j} – объем поперечного укорочения j -го монтажного сварного соединения, расположенного поперек судна; z_c , y_c , z_c , y_c – координаты центров тяжести объемов укорочений ΔV_{x_i} и ΔV_{y_j} относительно центра тяжести сечения конструкции на данном технологическом этапе.

В заключение следует заметить, что на величину объемов укороченных монтажных швов существенное влияние могут оказать усилия, возникающие от веса корпуса и от реакций кильблоков.

17.7. ПРИМЕР РАСЧЕТА ОБЩИХ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ БОРТОВОЙ СЕКЦИИ

Требуется определить ожидаемые общие сварочные деформации бортовой секции с продольной системой набора (рис. 17.7) в продольном и поперечном направлениях при раздельном методе ее изготовления.

Раздельный метод изготовления секции предусматривает следующую последовательность:

Первый технологический этап – сборка и сварка узлов секции:

- а) сборка и сварка шпангоутов таврового сечения;
- б) сборка полотнища наружной обшивки и сварка его с двух сторон.

Второй технологический этап – установка и приварка набора главного направления (ребер жесткости) к полотнищу;

Третий технологический этап – установка перекрестного набора (шпангоутов), приварка его к полотнищу и сварка набора между собой.

Рассматриваемую секцию расчлняем на одинаковые составляющие балки в продольном и поперечном направлениях: при определении деформаций секции на определенном этапе ее изготовления достаточно рассмотреть деформации одной продольной составляющей балки или

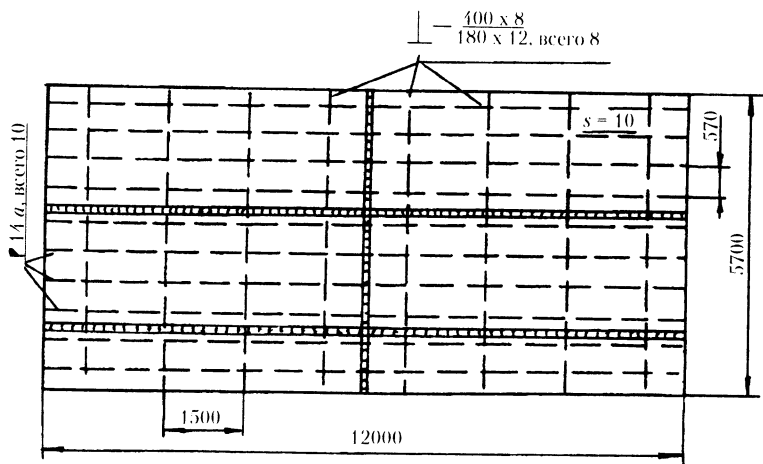


Рис. 17.7. Схема бортовой секции

Таблица 17.4

Геометрические характеристики сечений составляющих балок

Наименование элемента	Эскиз	Характеристика		
		F, см ²	J, см ⁴	z, см
Сечение шпангоута		53,6	9745	11,7
Сечение поперечной составляющей балки		103,5	31200	-14,4
Сечение продольной составляющей балки		74,1	1254	-1,27

Таблица 17.5

Тепловые характеристики сварных швов

Наименование шва	Эскиз соединения	Катет, мм	Номер прохода	$q_{п.}$ кДж/см
Пазовые и стыковые швы полотнища		—	1 2	18 21
Поясные швы шпангоута		6	1; 2	10
Швы приварки шпангоутов к полотнищу		7	1; 2	15
Швы приварки ребер жесткости к полотнищу		6	1	10
Швы сварки набора между собой		7	1; 2	20

одной поперечной составляющей балки. Геометрические характеристики сечений балок (составляющих балок) и тепловые характеристики сварных швов приведены в табл. 17.4, 17.5.

Расчет ожидаемых общих сварочных деформаций секции ведем строго по технологическим этапам ее изготовления.

Первый технологический этап

1. Сборка и сварка шпангоутов.

Шпангоут представляет собой сварную тавровую балку: стенка сваривается с полкой поясным двусторонним швом (два близкорасположенных продольных шва):

- суммарный объем продольного укорочения

$$\sum_{i=1}^2 \Delta V_{x_i} = \Delta V_{x_{12}} = \mu_x \frac{\alpha}{c_p} q_n l_m K_n,$$

$$\Delta V_{x_{12}} = -1 \cdot 10^{-6} \cdot 10000 \times 570 \cdot 1,2 = -6,84 \text{ см}^3;$$

где $\mu_x = -0,335 K_T K_s K_\sigma$, принимаем $K_T = 0,85$; $K_s = 1$; $K_\sigma = 1$; $\frac{\alpha}{c_p} =$

$= 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{Дж}$ – для малоуглеродистой стали; $\mu_x \frac{\alpha}{c_p} = -0,335 \cdot 0,85 \times$

$\times 3,5 \cdot 10^{-6} = -1 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{Дж}$; $l_m = B = 570 \text{ см}$; $K_n = 1,2$;

- укорочение по центральной оси

$$\Delta B_0 = \frac{\Delta V_{x_{12}}}{F} = \frac{-6,84}{53,6} = -0,11 \text{ см};$$

- угол поворота концов шпангоута относительно друг друга

$$\varphi_y = \frac{1}{J_y} \Delta V_{x_{12}} z_c = \frac{(-6,84) \cdot 11,7}{9745} = -8,2 \cdot 10^{-3},$$

где $z_c = 11,7 \text{ см}$ (табл. 17.4);

- стрелка прогиба посередине шпангоута

$$f_z \left(\frac{B}{2} \right) = \frac{\varphi_y B}{8} = \frac{(-8,2 \cdot 10^{-3}) \cdot 570}{8} = -0,58 \text{ см}.$$

2. Сборка полотнища наружной обшивки и сварка его с двух сторон (один стыковой и два пазовых шва).

а. Укорочение полотнища в продольном направлении определяем по формуле

$$\Delta L_0 = \Delta L_n = \frac{1}{Bs} \left(\sum_{i=1}^n \Delta V_{x_i} + \sum_{j=1}^m \Delta V_{y_j} \right);$$

- суммарный объем продольного укорочения сварных соединений пазовых швов (от 1-го и 2-го проходов)

$$\sum_{i=1}^n \Delta V_{x_i} = 2 \mu_x \frac{\alpha}{c_p} q_n' l_m = 2(-1 \cdot 10^{-6}) \cdot 21000 \cdot 1200 = -50,4 \text{ см}^3,$$

где q_n' – погонная энергия сварки от 2-го прохода [см. формулу (17.4)];

$l_m = L = 1200 \text{ см}$;

- суммарный объем поперечного укорочения сварного соединения стыкового шва (от 1-го и 2-го проходов)

$$\sum_{j=1}^m \Delta V_{y_j} = \mu_y \frac{\alpha}{c_p} (q_n + q_n) l_m =$$

$$= -1,25 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6} (21000 + 18000) \cdot 570 = -97,26 \text{ см}^3,$$

где $\mu_y = -1,25$; $l_m = B = 570 \text{ см}$.

Следовательно:

$$\Delta L_n = \frac{-50,4 - 97,26}{570 \cdot 1} = -0,26 \text{ см}.$$

б. Укорочение полотнища в поперечном направлении определяем по формуле

$$\Delta B_0 = \Delta B_n = \frac{1}{Ls} \left(\sum_{j=1}^m \Delta V_{x_j} + \sum_{i=1}^n \Delta V_{y_i} \right);$$

- суммарный объем продольного укорочения сварного соединения стыкового шва (от 1-го и 2-го проходов)

$$\sum_{j=1}^m \Delta V_x = \mu_x \frac{\alpha}{\rho} q'_{\text{III}} l_{\text{III}} = (-1 \cdot 10^{-6}) \cdot 21000 \cdot 570 = -12,0 \text{ см}^3,$$

где $l_{\text{III}} = B = 570 \text{ см}$;

- суммарный объем поперечного укорочения сварных соединений пазовых швов (от 1-го и 2-го проходов)

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \Delta V_{y_i} &= 2\mu_y \frac{\alpha}{\rho} (q'_{\text{II}} + q_{\text{II}}) l_{\text{III}} = \\ &= 2(-1,25) \cdot 3,5 \cdot 10^{-6} (21000 + 18000) \cdot 1200 = -409,5 \text{ см}^3, \end{aligned}$$

где $l_{\text{III}} = L = 1200 \text{ см}$.

Следовательно:

$$\Delta B_{\text{II}} = \frac{-12,0 - 409,5}{1200 \cdot 1} = -0,35 \text{ см}.$$

Второй технологический этап

- Деформации сечения в продольном направлении от приварки ребер жесткости к полотнищу соответствуют деформациям продольных составляющих балок:
- объем продольного укорочения сварного соединения углового шва приварки ребра жесткости к полотнищу

$$\sum_{i=1}^n \Delta V_x = \Delta V_x = \mu_x \frac{\alpha}{\rho} q_{\text{II}} l_{\text{III}} = (-1 \cdot 10^{-6}) \cdot 10000 \cdot 1200 = -12,0 \text{ см}^3,$$

где $l_{\text{III}} = L = 1200 \text{ см}$;

- укорочение по центральной оси продольной составляющей балки

$$\Delta L_0 = \frac{\Delta V_x}{F} = \frac{-12,0}{74,1} = -0,16 \text{ см};$$

- угол поворота концов продольной составляющей балки

$$\varphi_Y = \frac{1}{J_Y} \Delta V_x z_c = \frac{(-12,0)(-1,27)}{1254} = 1,22 \cdot 10^{-2},$$

где $z_c = -1,27 \text{ см}$;

- стрелка прогиба посередине продольной составляющей балки

$$f_Z \left(\frac{L}{2} \right) = \frac{\varphi_Y L}{8} = \frac{1,22 \cdot 10^{-2} \cdot 1200}{8} = 1,83 \text{ см};$$

- укорочение присоединенного пояска продольной составляющей балки (укорочение полотнища)

$$\Delta L_{\text{II}} = \Delta L_0 + \varphi_Y z_{\text{II}} = -0,16 + 1,22 \cdot 10^{-2} (-1,77) = -0,18 \text{ см},$$

где $z_{\text{II}} = -1,27 - 0,5 = -1,77 \text{ см}$.

- Деформации сечения (полотнища) в поперечном направлении обусловлены сварными соединениями угловых швов приварки ребер жесткости к полотнищу (десять поперечных швов):

$$\Delta B_0 = \Delta B_{\text{II}} = \frac{1}{L_S} \sum_{j=1}^m \Delta V_{y_j};$$

- объем поперечного укорочения сварного соединения одного шва

$$\Delta V_y = \mu_y \frac{\alpha}{\rho} q_{\text{II,II}} l_{\text{III}};$$

часть погонной энергии, идущая на нагрев полотнища:

$$q_{\text{II,II}} = q_{\text{II}} \frac{2s}{2s + s_{\text{р.ж}}} = 10000 \frac{2 \cdot 1}{2 \cdot 1 + 0,7} = 7407 \text{ Дж/см};$$

коэффициент поперечного укорочения сварного соединения

$$\begin{aligned} \mu_y &= -1,25 \left[0,25 + 0,75 K_{\text{II,II}} (0,1 + 0,9 K_{\text{р}}) \right] = \\ &= -1,25 \left[0,25 + 0,75 \cdot 0,62 (0,1 + 0,9 \cdot 1) \right] = -0,894, \end{aligned}$$

где $K_{\text{II,II}} = 0,62$ определен из графика (см. рис. 16.6, а) для $\frac{q_{\text{II,II}}}{s^2} = 7407 \text{ Дж/см}^2$;

$K_{\text{р}} = 1,0$ определен из графика (см. рис. 16.6, б) для $\gamma \rightarrow \infty$.

Следовательно:

$$\Delta V_y = -0,894 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6} \cdot 7407 \cdot 1200 = -27,8 \text{ см}^3,$$

где $l_{\text{III}} = L = 1200 \text{ см}$;

- укорочение полотнища

$$\Delta B_{\Pi} = \frac{10(-27,8)}{1200 \cdot 1} = -0,23 \text{ см.}$$

Третий технологический этап

- Деформации секции в продольном направлении от приварки шпангоутов к полотнищу и сварки набора между собой соответствуют деформациям продольных составляющих балок (шестнадцать поперечных сварных швов приварки шпангоутов к полотнищу и шестнадцать поперечных сварных швов, соединяющих набор между собой):
- объем поперечного укорочения сварного соединения шва приварки шпангоута к полотнищу

$$\Delta V_{y_1} = \mu_{y_1} \frac{\alpha}{c\rho} q_{\Pi.П} l_{ш_1};$$

часть погонной энергии, идущая на нагрев полотнища:

$$q_{\Pi.П} = q_{\Pi} \frac{2s}{2s + s_{\text{шпн}}} = 15000 \frac{2 \cdot 1}{2 \cdot 1 + 0,8} = 10700 \text{ Дж/см};$$

коэффициент поперечного укорочения сварного соединения

$$\begin{aligned} \mu_{y_1} &= -1,25 \left[0,25 + 0,75 K_{\text{шп}} (0,1 + 0,9 K_p) \right] = \\ &= -1,25 \left[0,25 + 0,75 \cdot 0,92 (0,1 + 0,9 \cdot 0,62) \right] = -0,88, \end{aligned}$$

где $K_{\text{шп}} = 0,92$ определен из графика (см. рис. 16.6, а) для $\frac{q_{\Pi.П}}{s^2} = 10700 \text{ Дж/см}^3$,

$K_p = 0,62$ определен из графика (см. рис. 16.6, б) для $\gamma = \frac{t}{2s} = \frac{57}{2 \cdot 1} = 28,5$.

Следовательно:

$$\Delta V_{y_1} = -0,88 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6} \cdot 10700 \cdot 50 = -1,65 \text{ см}^3,$$

где $l_{ш_1} = 50 \text{ см}$;

- объем поперечного укорочения сварного соединения шва, соединяющего набор между собой:

$$\Delta V_{y_2} = \mu_{y_2} \frac{\alpha}{c\rho} q_{\Pi.р.ж} l_{ш_2};$$

часть погонной энергии, идущая на нагрев ребра жесткости:

$$q_{\Pi.р.ж} = q_{\Pi} \frac{2s_{р.ж}}{2s_{р.ж} + s_{\text{шпн}}} = 20000 \frac{2 \cdot 0,7}{2 \cdot 0,7 + 0,8} = 12730 \text{ Дж/см};$$

коэффициент поперечного укорочения сварного соединения

$$\begin{aligned} \mu_{y_2} &= -1,25 \left[0,25 + 0,75 K_{\text{шп}} (0,1 + 0,9 K_p) \right] = \\ &= -1,25 \left[0,25 + 0,75 \cdot 1 \left[0,1 + 0,9 \cdot 0,92 \right] \right] = -1,18, \end{aligned}$$

где $K_{\text{шп}} = 1$ определен из графика (см. рис. 16.6, а) для $\frac{q_{\Pi.р.ж}}{s_{р.ж}^2} = 26000 \text{ Дж/см}^3$;

$K_p = 0,92$ определен из графика (см. рис. 16.6, б) для $\gamma = \frac{2l_{ш_2}}{s_{р.ж}} = \frac{2 \cdot 14}{0,7} = 40$.

Следовательно:

$$\Delta V_{y_2} = -1,18 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6} \cdot 12730 \cdot 14 = -0,736 \text{ см}^3,$$

где $l_{ш_2} = 14 \text{ см}$;

- укорочение по центральной оси продольной составляющей балки

$$\Delta L_0 = \frac{1}{F} \sum_{j=1}^m \Delta V_{y_j} = \frac{1}{74,1} \left[16(-1,65) + 16(-0,736) \right] = -0,52 \text{ см};$$

- угол поворота концов продольной составляющей балки

$$\begin{aligned} \varphi_{\gamma} &= \frac{1}{J_{\gamma}} \sum_{j=1}^m \Delta V_{y_j} z_{c_j} = \frac{1}{1254} \left[16(-1,65)(-1,77) + 16(-0,736) \cdot 5,73 \right] = \\ &= -1,65 \cdot 10^{-2}, \end{aligned}$$

где $z_{c_1} = -1,27 - 0,5 = -1,77 \text{ см}$; $z_{c_2} = -1,27 + 7,0 = 5,73 \text{ см}$;

- стрелка прогиба посередине продольной составляющей балки

$$f_z\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{\varphi_Y L}{8} = \frac{(-1,65 \cdot 10^{-2}) \cdot 1200}{8} = -2,48 \text{ см};$$

- укорочение присоединенного пояска продольной составляющей балки (укорочение полотнища)

$$\Delta L_{II} = \Delta L_0 + \varphi_Y z_{II} = -0,52 + (-1,65 \cdot 10^{-2})(-1,77) = -0,49 \text{ см}.$$

- б. Деформации секции в поперечном направлении от приварки шпангоутов к полотнищу и сварки набора между собой соответствуют деформациям поперечных составляющих балок (двусторонний продольный сварной шов приварки шпангоута к полотнищу и двадцать поперечных швов, соединяющих набор между собой*):
- суммарный объем продольного укорочения

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \Delta V_{x_i} &= \Delta V_{x_{12}} = \mu_x \frac{\alpha}{c_p} q_{II} l_{III} K_{II} = \\ &= (-1 \cdot 10^{-6}) \cdot 15000 \cdot 570 \cdot 1,2 = -10,26, \text{ см}^3, \end{aligned}$$

где $l_{III} = B = 570 \text{ см};$

- укорочение по центральной оси поперечной составляющей балки

$$\Delta B_0 = \frac{\Delta V_{x_{12}}}{F} = \frac{-10,26}{103,5} = -0,10 \text{ см};$$

- угол поворота концов поперечной составляющей балки

$$\varphi_Y = \frac{1}{J_Y} \Delta V_{x_{12}} z_c = \frac{(-10,26)(-14,4)}{31200} = 4,7 \cdot 10^{-3},$$

где $z_c = 14,4 \text{ см};$

* При наличии вырезов в наборе (стенке шпангоута) для прохождения элементов набора другого направления указанные швы накладываются на кромку выреза (табл. 17.4). В этом случае влиянием этих швов на укорочение и изгиб поперечной составляющей балки можно пренебречь.

- стрелка прогиба посередине поперечной составляющей балки

$$f_z\left(\frac{B}{2}\right) = \frac{\varphi_Y B}{8} = \frac{4,7 \cdot 10^{-3} \cdot 570}{8} = 0,34 \text{ см};$$

- укорочение присоединенного пояска поперечной составляющей балки (укорочение полотнища)

$$\Delta B_{II} = \Delta B_0 + \varphi_Y z_{II} = -0,10 + 4,7 \cdot 10^{-3}(-14,9) = -0,17 \text{ см},$$

где $z_{II} = -14,4 - 0,5 = -14,9 \text{ см}.$

Общие деформации секции в продольном и поперечном направлениях, равные сумме соответствующих деформаций на каждом технологическом этапе, приведены в табл. 17.6.

Таблица 17.6

Общие сварочные деформации бортовой секции

Технологический этап	Продольное направление		Поперечное направление	
	Укорочение полотнища ΔL_{II} , см	Прогиб посередине секции $f_z\left(\frac{L}{2}\right)$, см	Укорочение полотнища ΔB_{II} , см	Прогиб посередине секции $f_z\left(\frac{B}{2}\right)$, см
Первый, п. 1	–	–	–	–0,58
Первый п. 2	–0,26	–	–0,35	–
Второй	–0,18	1,83	–0,23	–
Третий	–0,49	–2,48	–0,17	0,34
Итого:	–0,93	–0,65	–0,75	–0,24

Можно расчетным путем оценить общие сварочные деформации рассматриваемой секции и по другим возможным вариантам ее изготовления и выбрать оптимальный вариант, если и оптимальный вариант не обеспечивает требуемой точности, то следует предусмотреть мероприятия по предотвращению или уменьшению ожидаемых общих сварочных деформаций секций по назначенному варианту ее изготовления.

18. МЕСТНЫЕ СВАРОЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ

18.1. РАЗНОВИДНОСТИ МЕСТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Местные деформации характеризуют искажение формы отдельных элементов конструкции и обычно проявляются в выходе из плоскости свариваемых элементов. В некоторых случаях при сварке стыковых и тавровых соединений наблюдаются изломы и наклоны свариваемых элементов. Направленность этих изменений с возможной расчетной оценкой рассмотрена в подразд. 16.4.

Аналогичные деформации возникают при приварке набора к полотнищу, которое перегибается под ребрами, образуя так называемую ребристость полотнища. Однако для характеристики ребристости знание угла является уже недостаточным, необходимо располагать значением местного прогиба полотнища между ребрами жесткости.

Возможен и другой механизм выхода из плоскости отдельных элементов конструкции, наблюдающийся обычно при сварке тонколистовых конструкций. Например, в результате приварки набора к полотнищу в последнем между набором возникают напряжения сжатия, которые могут превзойти критические напряжения. В этом случае произойдет потеря устойчивости участков полотнища и между элементами набора образуются выпучины и впадины (бухтины). Иногда этот вид деформаций называют короблением. Именно при сварке тонколистовых конструкций, в частности при сварке корпусов речных судов, а также надстроек морских судов, деформации коробления наиболее значительны по сравнению с другими видами сварочных деформаций. Вместе с тем такие деформации не только понижают работоспособность сварной конструкции, но и ухудшают ее внешний вид. Правка тонколистовых конструкций с целью уменьшения их коробления является трудоемкой и дорогостоящей операцией.

В большинстве случаев деформации из плоскости свариваемых элементов обусловлены сразу обеими причинами, т. е. угловыми деформациями и потерей устойчивости элементов. Однако для простоты расчетов их рассматривают отдельно.

18.2. ДЕФОРМАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ПЛОСКОСТИ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ УГЛОВЫМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В подразд. 16.4 был рассмотрен случай сварки таврового соединения односторонним и двусторонним угловыми швами, возникающий при этом излом в полке характеризуется угловой деформацией β , зависящей главным образом от тепловых параметров процесса сварки $\left(\frac{q_{п.п.}}{s_{п.п.}^2}\right)$ и скорости сварки v .

В случае приварки набора (многих ребер жесткости) к полотнищу под каждым ребром жесткости полотнище получит излом, характеризующийся углом β , и конструкция будет иметь вид (рис. 18.1, а). Выход из плоскости элементов полотнища между ребрами жесткости в достаточной мере характеризуется максимальной стрелкой прогиба посередине $f_{\max}\left(\frac{l}{2}\right)$.

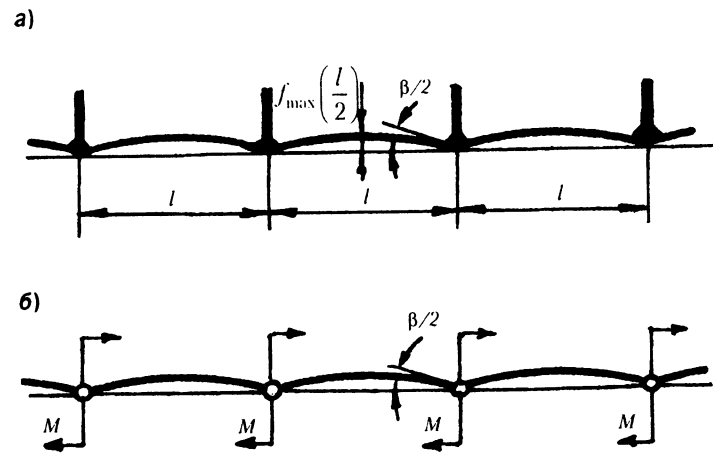


Рис. 18.1. Деформации плоских элементов из плоскости вследствие угловых деформаций:

а – ребристость полотнища от приварки к нему ребер жесткости;
б – расчетная схема изгиба многопролетных балок

Общий метод определения указанной деформации заключается в следующем. Из полотнища перпендикулярно к сварным швам выделяется балка-полоска. Шов, вызывающий изгиб полоски (выход элемента полотнища из плоскости), заменяется шарниром, в котором располагают фиктивный момент M (рис. 18.1, б). Величину момента определяют из условия равенства угла поворота конца балки-полоски (γ шарнира) угловой деформации β . Таким образом, задача сводится к известным расчетным схемам изгиба многопролетных балок, нагруженных моментами, для которых имеются готовые решения. В рассматриваемом случае максимальная стрелка прогиба элемента полотнища между набором

$$f_{\max} \left(\frac{l}{2} \right) = \frac{\beta l}{4}. \quad (18.1)$$

Эта формула позволяет оценивать направленный выход из плоскости полотнища между набором – всегда в сторону привариваемого набора. В сварочной практике в некоторых случаях наблюдается выход полотнища между набором и в другую сторону. Механизм этого возможного выхода из плоскости полотнища рассматривается в следующем подразделе.

18.3. ДЕФОРМАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ПЛОСКОСТИ ВСЛЕДСТВИЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ

Как известно, потеря устойчивости пластин возникает, если сжимающие напряжения в них достигают критической величины $\sigma_{кр}$. В подразд. 17.2 было показано, что сжимающие напряжения возникают от продольных швов на некотором расстоянии от оси шва (вне пластической зоны) и определяются распределением остаточных продольных напряжений в поперечном сечении полотнища от швов приварки элементов набора, а на рис. 18.2, б – в полке тавра от выполнения поясного шва. В обоих случаях распределение напряжений практически равномерно не только по ширине, но и по длине, т. е. почти по всей площади рассматриваемых элементов (исключая узкие участки пластических зон у швов).

Поэтому при определении деформаций от потери устойчивости полотнища после приварки к нему элементов набора можно применить схему шарнирно-закрепленной по четырем сторонам пластины, нагруженной по двум сторонам сжимающей нагрузкой (см. рис. 18.2, а).

Расчетная схема шарнирно-закрепленной по трем сторонам пластины с одной свободной продольной кромкой, нагруженной сжимающей нагрузкой по двум сторонам (см. рис. 18.2, б), отвечает второму случаю и позволяет проверить устойчивость половины полки тавра.

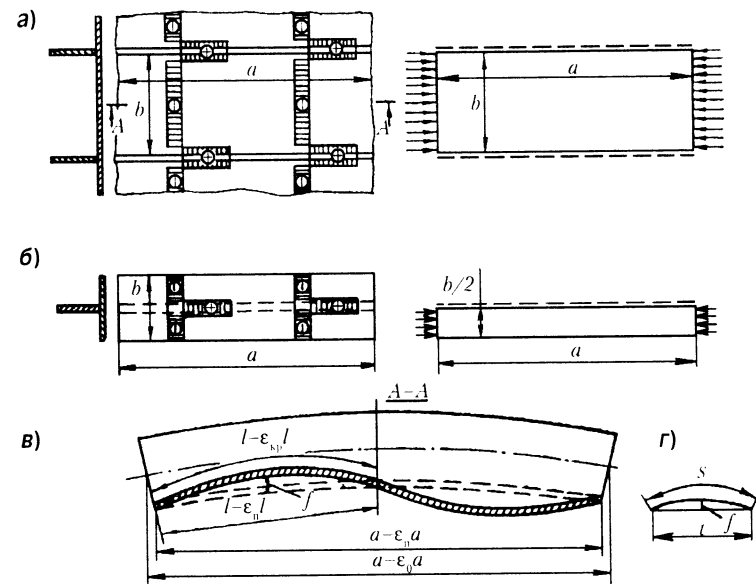


Рис. 18.2. Деформации плоских элементов из плоскости вследствие потери устойчивости:

- а – распределение остаточных продольных напряжений в полотнище от приварки к нему ребер жесткости и соответствующая ему расчетная схема пластины;
- б – то же в полке при сварке тавра;
- в – форма пластины при потере устойчивости;
- г – определение стрелки прогиба вынуженны

Для того чтобы пластина не потеряла устойчивости, должно выполняться условие

$$|\sigma_{\parallel}| < \sigma_{кр} \quad \text{или} \quad |\epsilon_{\parallel}| < \epsilon_{кр}, \quad (18.2)$$

где $|\sigma_{\parallel}|$, $|\epsilon_{\parallel}|$ – абсолютное значение напряжений (или соответствующих им относительных деформаций) в полотнище или полке тавра соответственно.

Напряжения сжатия в полотнище (полке), обусловленные сваркой (в случае полотнища с набором рассматривается составляющая балка, см. подразд. 17.6), равны

$$\sigma_{\parallel} = E(\epsilon_0 + c_Y z_{\parallel}) = E \left(\frac{\Delta r_{\parallel}}{F} + \frac{\Delta r_{\parallel}}{J_Y} z_c z_{\parallel} \right), \quad (18.3)$$

где Δr_1 – объем продольного укорочения сварного соединения на единицу длины шва; F – площади поперечного сечения составляющей балки (полотнище с набором) или тавра; J_y – моменты инерции составляющей балки или тавра; z_c – координата центра тяжести объема укорочения; z_n – координаты центра тяжести присоединенного пояска (полотнища) или полки тавра.

Критические напряжения определяются по известной формуле

$$\sigma_{кр} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{s}{b}\right)^2, \quad (18.4)$$

где k – коэффициент, зависящий от соотношения сторон пластины и характера закрепления ее кромок (табл. 18.1); ν – коэффициент Пуассона, принимаемый равным 0,3; s – толщина пластины; b – ширина пластины.

Таблица 18.1

Значение коэффициента k в выражении $\sigma_{кр}$ пластины, сжатой в продольном направлении

Эскиз пластины	Отношение сторон пластины a/b									
	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	3,0	∞
	5,14	4,20	4,00	4,13	4,47	4,20	4,05	4,00	4,00	4,00
	3,65	2,15	1,44	1,14	0,95	0,84	0,76	0,70	0,56	0,46

Когда условие (18.2) не выполняется, т. е. $|\sigma_{н}| > \sigma_{кр}$, элемент теряет устойчивость, приобретая определенную форму (рис. 18.2, в).

Если длина пластины a значительно больше ее ширины b , то, теряя устойчивость, пластина разбивается узловыми линиями на отдельные участки, длина которых $l \approx b$ для пластины, закрепленной по двум продольным кромкам, и $l \approx 1,64b$ для пластины, одна продольная кромка которой свободна.

Приближенное определение деформаций из плоскости в закритической области проведем, исходя из следующих соображений. В момент потери устойчивости деформации в плоскости пластины равны $\epsilon_{кр} = \frac{\sigma_{кр}}{E}$. Эти деформации не меняются в закритической области,

так как сближение торцевых сторон пластины, обусловленное дальнейшим укорочением металла в районе швов, приводит лишь к увеличению выпучины, не меняя ее длины по дуге. Таким образом, конечная длина дуги выпучины

$$S = l - l\epsilon_{кр} = l(1 - \epsilon_{кр}), \quad (18.5)$$

где l – расстояние между узловыми линиями пластины.

Если относительная деформация сжатия $\epsilon_{н}$ в полотнище или полке тавра по абсолютной величине превосходит величину критической деформации $\epsilon_{кр}$, то хорда t , замыкающая дугу выпучины, определится по выражению

$$t = l - l|\epsilon_{н}| = l(1 - |\epsilon_{н}|). \quad (18.6)$$

Задаваясь теперь формой выпучины, можно приближенно определить ее стрелку прогиба. Так, например, если считать, что выпучина имеет форму дуги окружности (рис. 18.2, з), то, используя известное из геометрии соотношение

$$f\left(\frac{t}{2}\right) = \sqrt{\frac{3}{16}(S^2 - t^2)}, \quad (18.7)$$

получаем

$$f\left(\frac{l}{2}\right) = 0,43l\sqrt{(1 - \epsilon_{кр})^2 - (1 - |\epsilon_{н}|)^2} \approx 0,61l\sqrt{|\epsilon_{н}| - \epsilon_{кр}}. \quad (18.8)$$

Следует отметить, что выбор формы выпучины мало влияет на стрелку ее прогиба. Например, синусоидальная форма приводит к выражению

$$f\left(\frac{l}{2}\right) = 0,63l\sqrt{|\epsilon_{н}| - \epsilon_{кр}}. \quad (18.9)$$

Учитывая приближенную схему, а также оценочный характер расчетов местных деформаций, стрелку прогиба выпучины определяют по формуле

$$f\left(\frac{l}{2}\right) = 0,6l\sqrt{|\epsilon_{н}| - \epsilon_{кр}}. \quad (18.10)$$

где 0,6 – усредненное значение значимого коэффициента.

19. МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ

19.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Очень часто служебные свойства и работоспособность сварных конструкций практически не зависят от остаточных сварочных напряжений и деформаций. Имеются, однако, примеры их выраженного отрицательного действия. Например, в летательных аппаратах, судах, энергетических установках перемещения, искажающие поверхности, которые обтекаются потоками газа или жидкости, увеличивают сопротивление потоку. Значительные геометрические искажения (общие и местные) нарушают требования технической эстетики, ухудшают товарный вид сварной конструкции и т. д. Поэтому в процессе проектирования, изготовления и эксплуатации сварных конструкций необходимо это учитывать.

Рассмотренные в предыдущих разделах расчетные методики (рекомендации) по определению общих сварочных деформаций и напряжений позволяют оценить величины и характер изменения начальной формы и размеров сварной конструкции при ее изготовлении. При этом на базе сравнения нескольких вариантов изготовления конкретной конструкции можно выбрать оптимальную последовательность сборки и сварки, обеспечивающую минимальные геометрические искажения готовой конструкции. Если же и эта оптимальная последовательность сборки и сварки конструкции не обеспечивает требуемой точности, можно предусмотреть специальные способы и условия сварки, при которых сварочные деформации уменьшаются. Однако специальные способы и условия сварки, как правило, требуют дополнительных затрат, поэтому целесообразно еще на стадии проектирования сварной конструкции учитывать особенности ее изготовления. Иначе говоря, разработку конкретной конструкции необходимо вести параллельно с разработкой технологического процесса ее изготовления, т. е. осуществлять конструктивно-технологическое проектирование. Следует заранее в каждом конкретном случае, учитывая особенности сварной конструкции, предусматривать возможные методы уменьшения сварочных деформаций и напряжений.

В основе методов уменьшения деформаций и напряжений лежат следующие принципы, учитывающие физическую сущность термомеханических процессов, происходящих при сварке:

- снижение величины и зоны распространения пластических деформаций укорочения путем уменьшения погонной энергии сварки, применения начальных растягивающих усилий в зоне сварных соединений и т. д.;
- назначение рациональной последовательности сборки и сварки конструкции, рациональное расположение и выполнение сварных швов и т. п.;
- компенсация ожидаемых геометрических искажений сварной конструкции путем создания предварительных перемещений, обратных по знаку сварочным, и т. д.;
- создание пластических деформаций удлинения, компенсирующих пластические деформации укорочения, при охлаждении шва или после сварки путем термообработки, растяжения, прокатки, вибрации и пр.

В зависимости от того, на каком этапе производства сварной конструкции применяются методы уменьшения сварочных деформаций и напряжений, они делятся на конструктивно-технологические и чисто технологические. В свою очередь, технологические методы уменьшения сварочных деформаций и напряжений можно разделить на методы их предупреждения и методы устранения. Первые используются на этапе изготовления конструкции, т. е. во время ее сборки и сварки, вторые – после сварки в готовой конструкции.

19.2. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

1. Следует стремиться к уменьшению количества сварных швов в конструкциях за счет применения прокатных, гнутых и гофрированных элементов, листов больших размеров, литых, кованных и штампованных заготовок и т. п.
2. Особое внимание уделять технологичности сварных конструкций, т. е. доступности для выполнения всех сварочных работ, возможности максимального использования автоматической и полуавтоматической сварки, обеспечивающих большее проплавление при меньших значениях погонной энергии сварки, возможности проведения в случае необходимости правочных работ.

3. Назначать размеры швов минимальными, так как объемы укорочений прямо пропорциональны погонной энергии сварки. Иметь в виду, что предпочтительнее назначать многопроходные швы.

Стыковые швы следует назначать с минимальным усилением, предпочитая X-образную разделку кромок V-образной, так как при этом примерно вдвое уменьшается количество наплавленного металла, уменьшаются или совсем исключаются угловые деформации (рис. 19.1, а).

Угловые швы тавровых соединений следует назначать с катетом, минимально допустимым по условию прочности. Если такой катет получается меньше, чем технологически осуществимый (~3,5 мм), то назначают прерывистый шов (рис. 19.1, б). Если же расчетный катет получается больше 6 мм, то целесообразнее назначать двусторонний равнопрочный шов (рис. 19.1, в). В этом случае при значительной экономии сварочных материалов суммарный объем продольного укорочения составит 30% от объема укорочения равнопрочного одностороннего шва (см. подразд. 17.5, пример 1). При выполнении двусторонних прерывистых швов следует отдавать предпочтение расположению швов в шахматном порядке, чем при таком же шве с расположением в цепном порядке (рис. 19.1, г).

4. Конструкции балочного типа проектируют с таким поперечным сечением и расположением швов, при котором во избежание остаточных деформаций изгиба действие швов было бы взаимоуравновешенным, т. е. швы располагались бы относительно главных осей симметрично.

5. Обращать особое внимание при проектировании тонколистовых сварных конструкций на возможное коробление плоских элементов вследствие потери ими устойчивости. С этой целью следует заранее расчетным путем оценить величины сжимающих сварочных напряжений в тонких плоских элементах и величины критических напряжений. И в случае неизбежного коробления более рационально внести изменения в конструкцию: например, можно увеличить толщину полотна между ребрами жесткости или, что целесообразнее, уменьшить поперечный размер (ширину) плоского элемента. Так, если полотно между двумя ребрами жесткости теряет устойчивость (см. рис. 18.2, а), то лучше добавить еще продольное ребро между ними, т. е. уменьшить величину b вдвое. Это повысит значение критических напряжений $\sigma_{кр}$ в четыре раза, а величину сжимающих сварочных напряжений в полотнище – примерно в два раза. Следовательно, полотнище между ребрами жесткости

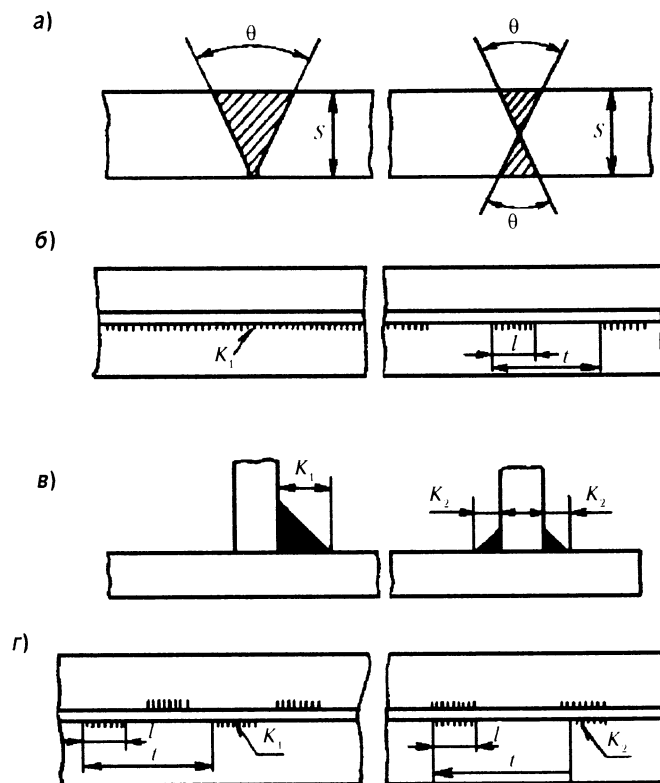


Рис. 19.1. Варианты выполнения сварных соединений:

- а – стыковые с V- и X-образной разделкой кромок;
- б – тавровые с непрерывным и прерывистыми швами;
- в – тавровые с односторонним и двусторонними швами;
- г – тавровые с расположением швов в шахматном и цепном порядке

станет более устойчивым. Уменьшение b одновременно снизит ребристость в районе сварных соединений. Следует заметить, что постановка поперечных ребер жесткости менее эффективна.

Приведенные выше методы не являются всеохватывающими и носят, скорее, рекомендательный характер. Следует иметь в виду, что назначение конструктивно-технологических методов уменьшения сварочных деформаций и напряжений для конкретной сварной конструкции индивидуально и требует комплексного подхода, т. е. анализа назначения и степени ответственности конструкции (ее тактико-

технических данных), условий эксплуатации и многих других факторов.

19.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

1. Применение рациональной последовательности сборки и сварки конструкций, которая либо предусмотрена проектом конструкции, либо назначена технологом в пределах имеющихся у него возможностей. Технолог, владея расчетным методом определения общих сварочных деформаций, может рассмотреть несколько технологически возможных вариантов изготовления конструкции и выбрать оптимальный, обеспечивающий требуемую точность размеров конструкции при минимальной трудоемкости (см. подразд. 17.5, пример 2).
2. Назначение экономичных способов и режимов сварки с минимальным тепловложением, т. е. максимальное использование автоматической и полуавтоматической сварки.
3. Применение соответствующей оснастки и приспособлений для сборки и закрепления свариваемых элементов. Они особенно эффективны для ликвидации временных перемещений (в процессе сварочного нагрева и охлаждения), которые могут быть значительны по величине. Например, прижатие тонких листов при сварке стыковых соединений, закрепление ребер при выполнении угловых швов и т. д. Следует заметить, что остаточные деформации свариваемого изделия после освобождения от закрепления будут мало отличаться от деформаций изделия, сварка которого выполнялась в свободном состоянии. Однако закрепление может дать и положительный эффект, если конструкция (например, плоскостная секция с набором в двух направлениях) имеет большое количество продольных и поперечных швов. По мере выполнения швов закрепленное по периметру полотнище секции будет испытывать растяжение, и последующие швы будут выполняться на растянутом металле, что приведет к снижению объемов укорочений последующих швов. Эффект крепления изделия к технологической оснастке может быть положительным и за счет повышенного теплоотвода от свариваемого изделия в металлоемкую оснастку при условии его плотного прижатия на всем протяжении швов.
4. Применение искусственного охлаждения. Повышенный теплоотвод от высоконагретой зоны металла при сварке может быть получен при использовании охлаждаемых подкладок и накладок, при обдуве швов воздухом или газовой смесью. Искусственное охлаждение приводит к уменьшению объемов укорочений и, следовательно, к уменьшению общих сварочных деформаций. Однако, и это не следует забывать, односторонний поверхностный теплоотвод (чаще с обратной стороны свариваемого изделия) может привести к более неравномерному прогреву изделия по толщине, что в свою очередь увеличит угловые деформации.
5. Использование предварительного растяжения. Растяжение сварного соединения при сварке до его полного охлаждения приводит к уменьшению объема продольного укорочения и, следовательно, к уменьшению остаточных деформаций (см. подразд. 16.2). Чаще предварительное растяжение достигается путем упругого изгиба, реже – растяжением. Для полного снятия остаточных напряжений необходимо растянуть металл в зоне сварного соединения до потери упругих свойств $\sigma_{\text{н}} = \sigma_{\text{с}}$, что требует для реальных конструкций сложных нагружающих устройств, именно по этой причине этот метод на производстве применяется редко.
6. Компенсация ожидаемых общих сварочных деформаций, заключающаяся в соответствующем изменении начальных размеров свариваемых элементов и придании им обратных пластических выгибов. С этой целью корректируются размеры деталей, направляемых на сборку, а также форма постели, на которой производят сборку и сварку секций. Указанную корректировку выполняют на основании результатов расчета общих сварочных деформаций секции. Зная величины ожидаемых деформаций, нетрудно установить, лежат ли отклонения размеров и формы секции в пределах заданных допусков. Если оптимальный вариант последовательности сборки и сварки секции не обеспечивает требуемой точности, то необходимо предусмотреть специальные мероприятия по уменьшению или компенсации возникающих деформаций.
7. Использование отдельного метода сборки и сварки плоскостных секций. Если плоскостная секция имеет набор в двух направлениях, то рекомендуется сначала ставить и приваривать автоматической сваркой набор того направления, протяженность швов которого больше (т. е. набор главного направления). Затем выставляют

перекрестный набор, приварку которого осуществляют полуавтоматической сваркой. Такая последовательность обеспечивает минимальные деформации изгиба секции в направлении, перпендикулярном к набору главного направления. Действительно, поперечные укорочения сварных соединений набора главного направления с полотнищем вызывает в этом случае укорочение секции, но не изгиб.

8. Применение раздельного метода формирования сложных объемных конструкций (секции третьей группы). В общем случае сложную конструкцию, например объемную днищевую секцию, расчленяют на отдельные узлы (подсекции), которые свариваются отдельно, как самостоятельные конструкции, с использованием требуемых мероприятий по уменьшению ожидаемых общих сварочных деформаций. Далее сложная конструкция формируется из готовых узлов (подсекций), причем сборку целесообразно вести от наиболее жесткого узла.

Формирование корпуса судна, являющегося очень сложной объемной конструкцией, следует вести на построечном месте из укрупненных узлов (крупных секций, блоков). Опыт существующих методов формирования корпусов судов на стапеле позволяет сделать ряд рекомендаций по уменьшению ожидаемых деформаций:

- желательно иметь минимум сварных швов, выполняемых при монтаже и влияющих на изгиб формирующегося корпуса;
- по возможности при формировании корпуса судна на стапеле сварку вести так, чтобы монтажные швы располагались как можно ближе к центральным осям сечения корпуса или симметрично относительно этих осей (см. подразд. 17.5, пример 2);
- сварку монтажных кольцевых стыков между блоками рекомендуется выполнять одновременно многими сварщиками по участкам, расположенным симметрично относительно диаметральной плоскости и центральной горизонтальной оси, при этом устраняются перекосы и расхождения еще незаваренных участков стыков и уменьшаются деформации изгиба корпуса.

Проиллюстрируем влияние поперечных монтажных (ремонтных) швов на примере варки вставок (заплат) в жестких конструкциях.

При выполнении сварных швов (рис. 19.2, а) свободное укорочение ΔB жестко закрепленного элемента шириной B запрещено, поэтому в нем образуются растягивающие напряжения

$$\sigma_y = E \frac{2\Delta B}{B}. \quad (19.1)$$

Из полученного выражения видно, что, чем меньше B , т. е. чем больше жесткость конструкции, тем больше значения растягивающих напряжений. С целью уменьшения напряжений можно сделать предварительный выгиб вставки, чтобы за счет увеличенной вследствие изгиба длины вставки компенсировать укорочение ΔB . При наличии выгиба вверх (рис. 19.2, б) по причине образования угловых деформаций, обусловленных как литейной усадкой, так и неравномерным прогревом по толщине, произойдет не уменьшение выгиба, а его увеличение, т. е. такой выгиб не только не уменьшит напряжения σ_y , а даже может их несколько увеличить. В случае выгиба вставки вниз (рис. 19.2, в) угловые деформации стыковых соединений способствуют компенсации укорочения ΔB за счет выпрямления вставки. Так можно добиться не только отсутствия напряжений, но и уменьшения местных геометрических искажений.

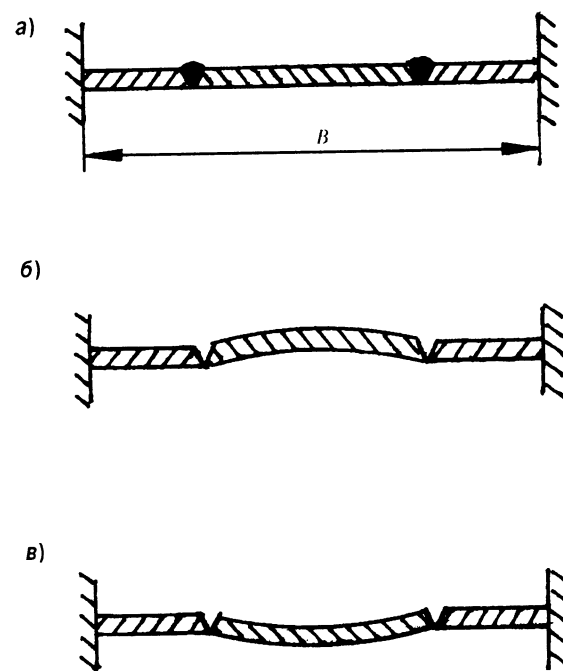


Рис. 19.2. Применение предварительного выгиба при варке вставок:
а – без выгиба; б – выгиб вверх; в – выгиб вниз

Для предотвращения местных сварочных деформаций применяются те же приемы, что и для борьбы с общими деформациями. Выделим наиболее простые.

1. Закрепление свариваемых элементов в процессе сварочного нагрева и охлаждения. Например, при односторонней сварке стыкового соединения закрепление следует располагать как можно ближе к шву, чтобы увеличить пластические деформации удлинения при охлаждении и тем самым уменьшить угловые деформации. Так, если без закрепления свариваемые элементы получили волнистость (рис. 19.3, *a*), то при закреплении (поджатии к основанию силой P) на расстояниях L_2 от шва угловые деформации уменьшаются: $\beta_2 < \beta_1$ (рис. 19.3, *б*), причем, чем меньше L_2 , тем меньше β_2 .
2. Предварительный обратный изгиб. На рис. 19.3, *в* показан простой и эффективный метод предотвращения угловых деформаций стыкового соединения: предварительный обратный изгиб должен быть таким, чтобы после сварки угловые деформации отсутствовали. Также этот метод может быть использован для уменьшения грибовидности тавровых соединений и для уменьшения ребристости полотна от приварки к нему набора (рис. 19.3, *г*).
3. Установка временных (технологических) ребер жесткости. Это технологический прием временного предупреждения местных деформаций из плоскости свободных элементов конструкции. Например, в готовой днищевой секции наблюдается коробление по свободным кромкам наружной обшивки в виде волнообразного изгиба. Это коробление можно предупредить предварительной установкой вдоль кромок временных жесткостей (рис. 19.4). Временные жесткости рекомендуется сохранять на все время сборки и сварки и снимать их на стапеле после установки и подгонки бортовых секций.

В заключение следует отметить, что не может быть универсальных однозначных рекомендаций по предотвращению сварочных деформаций различных видов. В каждом конкретном случае на базе теории сварочных деформаций и напряжений следует критически анализировать возможность применения различных методов уменьшения сварочных деформаций и применять оптимальный для конкретной конструкции. Не следует забывать, что всякие случайные принудительные подгонки при сборке вызывают в изделиях начальные напряжения, в результате чего нарушаются стабильность размеров и формы изделия. Борьба с такими деформациями чрезвычайно затруднена вследствие их

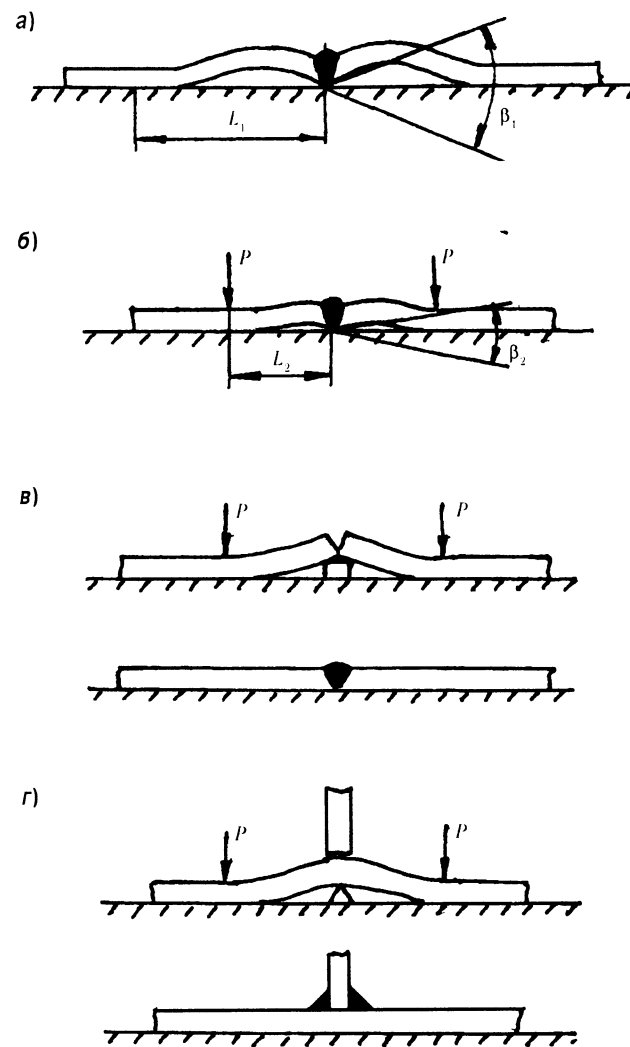


Рис. 19.3. Местные деформации листов при одностороннем сварочном нагреве:
a — без закрепления; *б* — с закреплением;
в, г — обратный изгиб

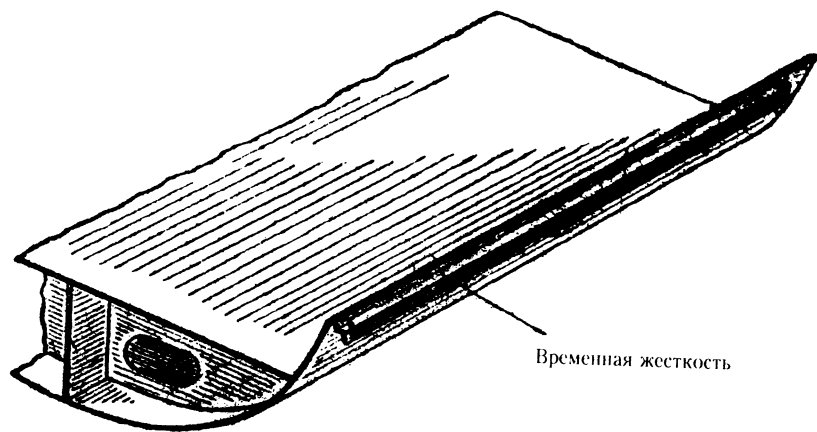


Рис. 19.4. Раскрепление, предупреждающее волнообразный изгиб кромок секции

случайного характера. Поэтому все конструктивные и технологические методы предотвращения сварочных деформаций эффективны только в случае отсутствия нарушений нормальной технологии сборки и сварки конструкции.

19.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УСТРАНЕНИЯ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ

Термическая обработка

Для снижения остаточных сварочных напряжений применяют отпуск сварных конструкций. Применение отпуска целесообразно, если предъявляются повышенные требования к прочности сварной конструкции и точности ее размеров при последующей эксплуатации. Кроме того, иногда целесообразно восстановить пластические свойства металла в зонах, где концентрировались пластические деформации при сварке, а также повысить сопротивляемость хрупким разрушениям. В остальных случаях применение отпуска не рекомендуется из-за удорожания стоимости производства конструкции.

Различают общий отпуск, когда равномерно нагревается все изделие, и местный – нагревают лишь часть конструкции в зоне сварного

соединения. При применении общего отпуска на этапах нагрева и выдержки образуются необратимые пластические деформации растяжения и деформации ползучести, что и приводит к снижению напряжений. Температуры отпуска [°C], обеспечивающие снижение остаточных напряжений до уровня $(0,05...0,2)\sigma$, для различных сплавов находятся в следующих пределах:

конструкционные стали	580...680
аустенитные стали	850...1050
алюминиевые сплавы	250...300
титановые сплавы	550...600

При применении местного отпуска, т. е. нагрева отдельных участков сварного соединения по необходимому ТЦ (газовое пламя, электрическая дуга, инфракрасные излучатели и др.), образуются необратимые пластические деформации растяжения в приповерхностных слоях сварного соединения, приводящие к перераспределению остаточных сварочных напряжений и снижению их уровня.

Механические способы

С целью компенсации пластических деформаций укорочения, обусловленных сваркой, создают в сварном соединении пластические деформации удлинения. Это достигается осаживанием металла по толщине для его удлинения в плоскости сварного соединения. При этом не стремятся к тому, чтобы обеспечить равномерное уменьшение пластических деформаций и, соответственно, остаточных напряжений в зоне сварного соединения. Преследуется только одна цель – уменьшение величин объемов укорочения. Обычно применяют следующие способы.

Прокровка – применяется как в процессе сварки по остывающему металлу, так и после полного охлаждения сварного соединения. Прокровкой осаживают металл по толщине, создавая пластические деформации удлинения в плоскости, перпендикулярной направлению удара. Этим достигают уменьшения растягивающих или даже появления сжимающих напряжений. Прокровка ведется механизированным инструментом с малыми (до 6...7 м/с), средними (до 100 м/с) и высокими (более 100 м/с) скоростями движения бойка. Прокровка маневренна, в этом ее преимущество перед другими методами. Следует опасаться снижения пластичности металла вследствие ее истощения при проковке.

Импульсная обработка взрывом – применяется как средство повышения выносливости сварных соединений при переменных нагрузках. При такой обработке происходит перераспределение остаточных сварочных напряжений. Для ее осуществления используют заряды ленточного типа, которые укладывают на обрабатываемые поверхности.

Прокатка зоны сварного соединения – используется, главным образом, для уменьшения остаточных напряжений и для заглаживания швов. В местах прокатки растягивающие напряжения уменьшаются и могут стать даже сжимающими. Прокатка производится стальными роликками шириной 5,0...15,0 мм. Не рекомендуется применять прокатку для конструкций из малопластичных материалов. При наличии коррозионной среды требуется проверка влияния прокатки на коррозионную стойкость сварных соединений.

Возможен и другой путь создания в сварном соединении пластических деформаций удлинения, заключающийся в растяжении сварного соединения в пределах всей конструкции за счет образования новых пластических деформаций удлинения. Это достигается нагружением уже готовой сварной конструкции – либо растяжением, либо (чаще) изгибом. Более подробно взаимодействие внешних усилий с полем остаточных сварочных напряжений на всех этапах нагружения сварного соединения будет рассмотрено в следующем разделе.

Когда готовое судно еще находится на построечном месте (на наклонном стапеле), в металле его корпуса уровень и распределение остаточных напряжений, обусловленных сборочно-сварочными работами, наиболее опасны. Спуск судна – это первое наиболее опасное испытание в его жизни. Можно утверждать, что при благополучном спуске, т. е. после первого серьезного нагружения (нагружения изгибом), судно становится как бы «моложе».

Также следует отметить очень перспективный метод уменьшения остаточных сварочных напряжений – *механическую вибрацию*. Сущность метода – воздействие на сварную конструкцию переменной нагрузкой, создаваемой с помощью вибратора на частоте, близкой к резонансной. Основные преимущества метода вибрации – универсальность и простота оборудования, высокая скорость снятия напряжений. Он особенно эффективен, когда не может быть использована термообработка, например в случае сварных соединений из разнородных металлов.

Термическая правка

Метод термической правки получил широкое распространение при производстве сварных конструкций благодаря простоте и маневренности. Метод основан на создании с помощью местного нагрева дополнительных пластических деформаций укорочения в зонах, имеющих излишнее удлинение. Механизм образования деформаций при правке аналогичен сварочному. В качестве источников теплоты используется главным образом газовое пламя, позволяющее довольно просто регу-

лировать количество и распределение вводимой теплоты. Сварочная дуга, как более концентрированный источник, используется для правки конструкций из материалов с высокой теплопроводностью. Нагрев ведут пятнами или полосами. Необходимо стремиться к кратковременному и концентрированному нагреву, чтобы соседние зоны оставались не нагретыми и сопротивлялись расширению нагретого металла, вызывая в нем пластические деформации укорочения.

О результате правки можно судить лишь после полного охлаждения конструкции. Листовые элементы иногда после нагрева осаживают молотками на плоскость. Так как нагретый металл имеет низкий предел текучести, то он легко осаживается, при этом в нем возникают пластические деформации укорочения.

Успех правки зависит от квалификации и опыта правщика, так как технологу трудно регламентировать и контролировать все параметры правки.

20. ПРОЧНОСТЬ И КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

20.1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Прогнозирование прочности и долговечности сварных соединений и конструкций должно базироваться на достаточно надежных и в то же время простых методах расчета. Основной целью расчетов является сопоставление напряженного состояния, возникающего в конструкции под действием внешних нагрузок, с опасным напряженным состоянием, характерным для конкретных условий эксплуатации и характеризующимся так называемыми критериями прочности. Установление этих критериев требует теоретического и экспериментального изучения закономерностей процесса разрушения и по сути является комплексной проблемой, зависящей от многих факторов, некоторые из них до настоящего времени еще не исследованы в достаточной мере.

Сварное соединение является наиболее уязвимым местом сварной конструкции, во многих случаях именно в этих местах наблюдалось зарождение и развитие первичных разрушений. Это обусловлено специфичностью сварного соединения в пределах конструкции: структурной и химической неоднородностью металлов шва и околошовных зон, формой и размерами сварного соединения и конструкции в целом, наличием микро- и макроскопических дефектов, уровнем и распределением остаточных сварочных напряжений и деформаций. С учетом внешних факторов (температура, степень агрессивности среды и др.) в эксплуатационной практике наблюдались как вязкие, так и хрупкие разрушения.

Если перед разрушением металл испытывает, кроме упругой, значительную пластическую деформацию, говорят о вязком разрушении и о пластичном состоянии металла. Если разрушение происходит после упругой либо незначительной пластической деформации (порядка 1%), говорят о хрупком разрушении и хрупком состоянии металла. Величина пластической деформации, в свою очередь, определяет затраты энергии на процесс самого разрушения. В случае вязкого разрушения эта энергия больше, так как она расходуется в значительной мере на пластическую деформацию металла. О характере разрушения можно судить по виду поверхности самого излома: вязкое разрушение характеризуется матовой, волокнистой, без металлического блеска поверхностью излома. Хрупкий разрыв приводит к образованию гладкой поверхности излома с характерным кристаллическим видом.

Хрупкость и вязкость не есть неизменные свойства металлов шва или основного металла, а являются состояниями, в которых они могут находиться.

Как правило, сварные соединения в хрупком состоянии для эксплуатации не пригодны. Они чувствительны к концентраторам напряжений, плохо сопротивляются ударным нагрузкам. Сварные соединения, которые имеют большой запас пластичности, лишены этих недостатков.

Двойственный характер разрушения металлов обуславливает необходимость разработки двух расчетных методик оценки прочности сварных соединений и конструкций. Одна методика должна позволять производить оценку прочности в условиях нахождения металла конструкции в пластичном состоянии и предусматривать возможность вязкого разрушения; другая – позволять оценивать прочность сварных соединений и конструкций, металлы которых находятся в хрупком состоянии, и предусматривать возможность хрупкого разрушения. Первая из указанных методик давно разработана, многократно экспериментально проверена и широко используется в инженерной практике. Надежной методики расчета сварных соединений и конструкций на вероятность хрупкого разрушения еще не существует, хотя этой проблеме уделяется все возрастающее внимание. В настоящее время для оценки хрупкой прочности сварных соединений применяются специальные испытания и различного рода пробы. Полученные при этом экспериментальные данные о склонности к хрупким разрушениям позволяют выбрать основные и сварочные материалы, назначить технологию сварки и конструктивное оформление сварных соединений такими, при которых исключается возможность хрупкого разрушения.

20.2. ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Излагаемые ниже методы расчета прочности ставят задачи оценить несущую способность, т. е. допускаемое усилие для проектируемых объектов и соединений, не определяя действительного распределения напряжений в них. Для сварных соединений, металл которых имеет достаточный запас пластичности, допущение о равномерном распределении напряжений при статическом нагружении является вполне оправданным и позволяет использовать простые расчетные схемы. Критериями прочности в них являются допускаемые напряжения.

Допускаемые напряжения в швах машиностроительных конструкций устанавливаются в зависимости от допускаемых напряжений для основного металла. С технологической стороны, такой способ установления допускаемых напряжений в сварных соединениях вполне оправдан, так как при автоматической сварке под флюсом, сварке в среде защитных газов и в других случаях механические свойства металла швов зависят в значительной степени от механических свойств основного металла. Это положение позволяет проектировать сварные соединения, равнопрочные основному металлу.

Сварные соединения сталей, выполненные дуговой сваркой, по определению допускаемых напряжений, делят на две группы.

К первой группе относятся швы низкоуглеродистых обыкновенного качества и низколегированных сталей, у которых механические свойства металлов швов и околошовных зон соответствуют свойствам основного металла.

Рекомендуемые допускаемые напряжения для металлов швов первой группы приведены в табл. 20.1. Например, при сварке низкоуглеродистой стали марки Ст.3, для которой допускаемое напряжение при растяжении $[\sigma]_p = 160$ МПа, допускаемые напряжения для металлов швов, выполненных автоматической сваркой под флюсом или электродами типа Э42А, будут иметь следующие значения: при растяжении $[\sigma']_p = 160$ МПа, при сжатии $[\sigma']_{сж} = 160$ МПа, при срезе $[\tau'] = 100$ МПа.

Таблица 20.1

Допускаемые напряжения металла сварных соединений низкоуглеродистых обыкновенного качества и низколегированных сталей

Технологический процесс сварки	Допускаемые напряжения		
	растяжение $[\sigma']_p$	сжатие $[\sigma']_{сж}$	срез $[\tau']$
Дуговая автоматическая и полуавтоматическая под флюсом, в среде защитных газов, сварка электродами типа Э42А, Э50А	$[\sigma]_p$	$[\sigma]_p$	$0.65[\sigma]_p$
$[\sigma]_p$ – допускаемое напряжение при растяжении для основного металла			

Ко второй группе относят швы сталей со специальными свойствами: высокопрочных, коррозионностойких и др., – у которых свойства металлов швов или металлов околошовных зон ниже свойств основного металла.

Для швов второй группы сталей допускаемые напряжения назначаются на основе специально проведенных экспериментов в условиях, соответствующих работе проектируемой сварной конструкции.

Рассмотрим способы расчета прочности типичных сварных соединений (стыковое, нахлесточное, тавровое) при возможных вариантах статического нагружения растягивающим (сжимающим) усилием, моментом и перерезывающей силой.

Расчеты прочности сварных соединений при растяжении (сжатии)

Стыковые соединения (рис. 20.1, а). Шов в этом случае работает на разрыв. За опасное сечение шва принимают площадь $l_{ш} s$, пренебрегая усилением шва. Условие прочности имеет вид

$$\sigma = \frac{N}{l_{ш} s} \leq [\sigma']_p, \quad (20.1)$$

где N – растягивающее усилие; $l_{ш}$ – расчетная длина шва, равная его полной длине (т. е. ширине листа) за вычетом 1 см. Если концы шва (начало и конец) с помощью выводных планок выведены за предел листа, то следует вводить в расчет полную длину шва; s – толщина листа; $[\sigma']_p$ – допускаемое напряжение при растяжении для металла шва.

Если действует сжимающее усилие, то в условие прочности (20.1) вводится допускаемое напряжение на сжатие для металла шва $[\sigma']_{сж}$.

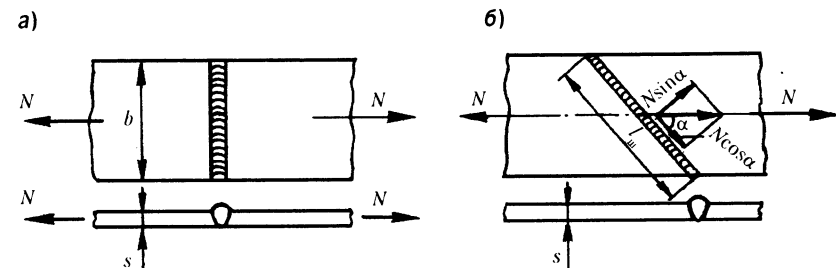


Рис. 20.1. К расчету прочности сварных стыковых соединений при растяжении: а – стыковой шов; б – косой стыковой шов

Стыковой шов может быть расположен под углом к направлению усилия (рис. 20.1, б). В этом случае проверку прочности стыкового соединения выполняют по условиям

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{N \sin \alpha}{l_{\text{ш}} s} \leq [\sigma']_{\text{р}}; \\ \tau &= \frac{N \cos \alpha}{l_{\text{ш}} s} \leq [\tau']. \end{aligned} \right\} \quad (20.2)$$

где α – угол между направлением усилия и осью шва; $[\tau']$ – допускаемое напряжение при срезе для металла шва.

Расчет прочности стыковых швов не производят, если допускаемое напряжение для металла шва равно допускаемому напряжению для основного металла или больше его.

В стыковых соединениях сталей и сплавов, подвергаемых термической обработке, наиболее слабым участком сварного соединения оказывается не металл шва, а прилегающая к нему зона, которая в результате термического действия дуги может оказаться разупрочненной. Поэтому расчет прочности швов заменяется расчетом прочности ослабленных зон с учетом механических свойств металла этих зон.

Нахлесточные соединения. В нахлесточных соединениях швы являются угловыми.

При электродуговой сварке угловые швы имеют различные очертания: нормальные, условно принимаемые очерченными в форме равнобедренного треугольника, выпуклые, вогнутые (рис. 20.2, а–в). Выпуклые швы нецелесообразны ни с технической, ни с экономической стороны: они требуют больше наплавленного металла, вызывают концентрацию напряжений.

Целесообразны швы, имеющие очертания неравнобедренных треугольников с отношением основания шва к высоте 1,5:1; 2:1 (рис. 20.2, г, д). В швах этого типа иногда производят механическую обработку поверхности краев швов с целью обеспечения плавного сопряжения наплавленного металла с основным (рис. 20.2, е). Подобного рода швы, как будет показано ниже, целесообразно применять в конструкциях, работающих при циклических нагружениях.

В широкой практике конструирования распространено применение угловых швов с нормальными очертаниями, характеризуемых катетом k . Следует заметить, что угловые швы при автоматической сварке под флюсом характеризуются более глубоким проплавлением, чем при ручной сварке. Поэтому целесообразно ввести понятие расчетной высоты шва, зависящей от технологического процесса сварки и от глу-

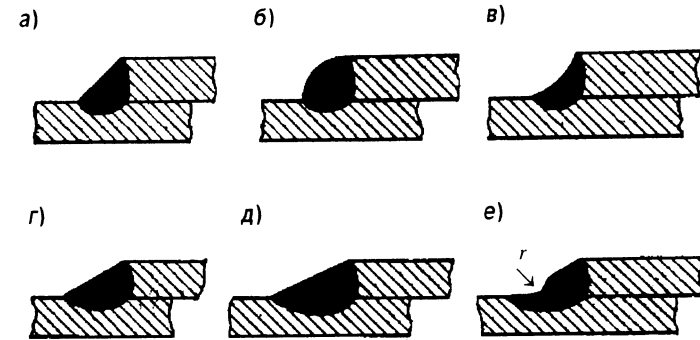


Рис. 20.2. Очертания угловых швов:

а – нормальное; б – выпуклое; в – вогнутое; г – с отношением катетов 1:1,5; д – с отношением катетов 1:2; е – с отношением катетов 1:2 с обработкой конца шва

бины проплавления. Расчетная высота шва определяется величиной βk . При ручной и многопроходной автоматической и полуавтоматической сварке $\beta = 0,7$; для двух- и трехпроходной полуавтоматической сварки $\beta = 0,8$; для двух- и трехпроходной автоматической сварки и однопроходной полуавтоматической сварки $\beta = 0,9$; для однопроходной автоматической сварки $\beta = 1,1$.

Наименьший катет рабочих швов в машиностроительных конструкциях обычно не более 3,0 мм. Исключение составляют конструкции, в которых толщина свариваемых элементов меньше 3,0 мм. Верхний предел высоты швов не ограничен, но применение швов, у которых $k > 30$ мм, встречается редко. В местах зажигания и обрыва дуги механические свойства металла швов ухудшаются, поэтому минимальную длину угловых рабочих швов целесообразно ограничивать и принимать равной 30 мм. Швы меньших размеров применяют лишь в качестве нерабочих соединений.

В зависимости от направления угловых швов по отношению к действующему усилию их разделяют на лобовые, косые, фланговые: лобовые швы направлены перпендикулярно усилию, косые швы направлены к усилию под некоторым углом, фланговые швы направлены параллельно усилию.

Прочность лобовых, косых и фланговых швов рассчитывают на срез. За опасное сечение принимают плоскость, проходящую через наименьшую толщину швов, т. е. ширина опасного сечения принимается равной расчетной высоте углового шва βk . Условие прочности для нахлесточных соединений (рис. 20.3, а) имеет вид

$$\tau = \frac{N}{\beta k \sum l_{ш}} \leq [\tau], \quad (20.3)$$

где $\sum l_{ш}$ – суммарная длина швов (лобовых, фланговых, косых).

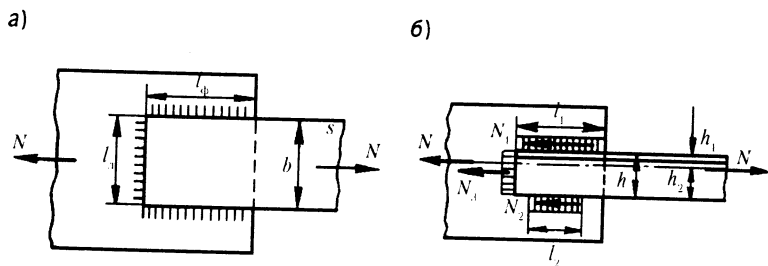


Рис. 20.3. К расчету прочности сварных нахлесточных соединений при растяжении:

a – соединение с лобовым и фланговыми швами;
б – приварка уголка лобовым и фланговыми швами

При расчете нахлесточного соединения (приварка уголка к листу, рис. 20.3, б) учитывают, что растягивающее (сжимающее) усилие проходит через центр тяжести поперечного сечения уголка и приложено не посередине между фланговыми швами, а смещено к первому шву, прикрепляющему уголок со стороны полки. Поэтому первый шов воспринимает большее усилие, чем второй. Усилие N уравнивается тремя силами N_1 , N_2 и N_3 , представляющими собой сопротивления трех швов, причем между силами N_1 и N_2 должно соблюдаться соотношение $N_1 : N_2 = h_2 : h_1$, где h_1 и h_2 – расстояния от силы N до N_1 и N_2 соответственно. При допущении о равномерном распределении напряжений указанное соотношение сил означает такое же соотношение площадей опасных сечений швов. Следовательно, можно записать

$$\frac{k_1 l_1}{k_2 l_2} = \frac{h_2}{h_1} \quad \text{или} \quad k_2 l_2 = k_1 l_1 \frac{h_1}{h_2}. \quad (20.4)$$

Условие прочности соединения уголка к листу можно записать в следующем виде:

$$\tau = \frac{N}{\beta(k_1 l_1 + k_2 l_2 + k_3 l_3)} \leq [\tau], \quad (20.5)$$

или, принимая во внимание (20.4) и учитывая, что $l_3 = h_1 + h_2 = h$:

$$\tau = \frac{N \frac{h_2}{h}}{\beta(k_1 l_1 + k_3 h_2)} \leq [\tau]. \quad (20.6)$$

Отсюда может быть определена длина первого шва (при назначенных катетах швов), а затем из (20.4) и длина второго шва.

Тавровые соединения. Угловые швы тавровых соединений, работающих на растяжение (сжатие), встречаются в корпусе судна в местах пересечения разрезного продольного или поперечного набора с непрерывным набором противоположного направления. Образованные элементами набора крестовые соединения (частный случай тавровых соединений) могут быть выполнены в двух вариантах: с полным проваром разрезного элемента набора (при разделке кромок с одной или двух сторон) (рис. 20.4, а) и без скоса кромок (рис. 20.4, б). При полном проваре разрезного элемента условие прочности шва имеет тот же вид, что и для стыкового шва [формула (20.1)], так как предполагается, что шов работает на разрыв, а за опасное сечение принимается сечение шва без учета его усиления.

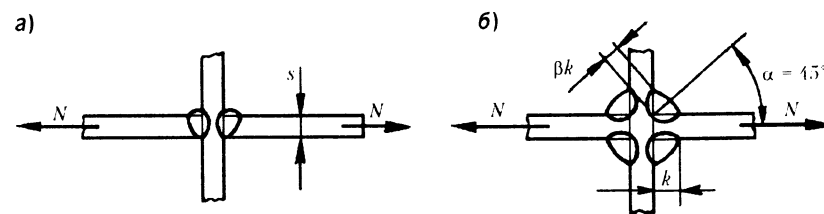


Рис. 20.4. К расчету прочности сварных тавровых соединений при растяжении:

a – соединение с полным проваром;
б – соединение с угловыми швами

При выполнении крестового соединения по второму варианту (см. рис. 20.4, б) условие прочности существенно отличается от (20.1), так как, во-первых, в угловом шве за опасное принимается сечение шириной, равной расчетной высоте углового шва βk , во-вторых, разрушение углового шва происходит в результате среза. Поэтому площадь среза двух швов равна $2\beta k l_{ш}$, а условие прочности имеет вид

$$\tau = \frac{N}{2\beta k l_{\text{ш}}} \leq [\tau'] \quad (20.7)$$

Расчет прочности сварных соединений при изгибе

Стыковые соединения. Эти соединения, работающие на изгиб (рис. 20.5, а), рассчитываются по формулам сопротивления материалов, установленным для целого сечения. Условие прочности имеет вид

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq [\sigma']_p, \quad (20.8)$$

где $W = \frac{sh^2}{6}$ – момент сопротивления сечения.

При наличии кроме момента M продольной силы N (рис. 20.5, б) напряжения в шве определяют по формуле

$$\sigma = \frac{M}{W} + \frac{N}{F} \leq [\sigma']_p, \quad (20.9)$$

где $F = sh$ – площадь поперечного сечения сварного соединения без учета усиления шва.

Так же как и при растяжении, при изгибе расчет прочности стыковых соединений не производится, если $[\sigma']_p \geq [\sigma]$.

Тавровые соединения. Прочность сварного соединения полосы сечением sh к стенке (рис. 20.5, в) при условии сквозного провара листа (что обеспечивается разделкой кромок с одной или двух сторон) рассчитывают по тем же формулам (20.8) и (20.9), что и для стыкового соединения. В случае, если приварка полосы к стенке выполнена с помощью угловых швов без разделки кромок (рис. 20.5, з), условие прочности имеет вид

$$\tau = \frac{M}{W_c} + \frac{N}{F_c} \leq [\tau'], \quad (20.10)$$

где $W_c = \frac{2\beta kh^2}{6}$ – момент сопротивления опасного сечения угловых швов; $F_c = 2\beta kh$ – площадь опасного сечения швов. Условие (20.10) учитывает, что угловые швы работают на срез.

Прочность поясных швов двутавровых (тавровых) балок (рис. 20.5, д) рассчитывают на срез, определяя касательные напряжения в швах. При

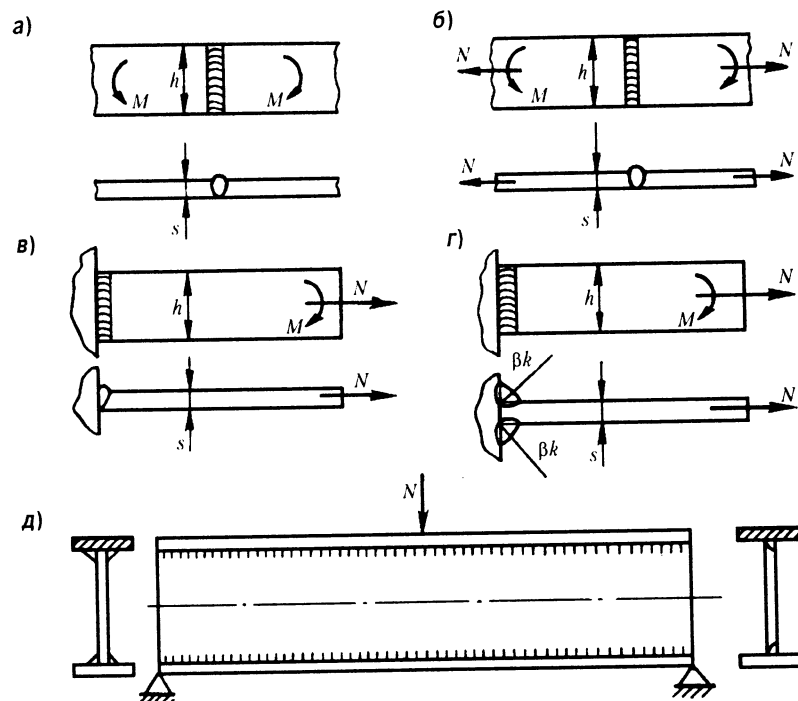


Рис. 20.5. К расчету прочности сварных соединений при изгибе:

- а, б – стыковое соединение;
- в – тавровое соединение с полным проваром;
- з – тавровое соединение с угловыми швами;
- д – поясные швы двутавра

этом, если пояски приварены к стенке угловыми швами без разделки (сечение слева), то условие прочности имеет вид

$$\tau = \frac{QS_{II}}{J2\beta k} \leq [\tau']. \quad (20.11)$$

Если поясные швы выполнены с полным проваром стенки (сечение справа), то условие прочности другое:

$$\tau = \frac{QS_{II}}{J_s c} \leq [\tau']. \quad (20.12)$$

где Q – перерезывающая сила в опасном сечении по длине балки (где Q имеет максимальное значение); S_n – статический момент площади пояса относительно оси Y ; J – момент сечения балки относительно оси Y ; s_c – толщина стенки.

Нахлесточные соединения. Прочность сварных соединений (лобовых и фланговых швов), лежащих в плоскости изгибающего момента M (рис. 20.6), может быть рассчитана методом расчленения усилий сопротивления швов на составляющие. Усилия сопротивления фланговых швов N_1 и N_2 создают пару, момент от которой

$$M_{\phi} = N_1(h+k) = \beta k l_{\phi} \tau (h+k),$$

где $(h+k)$ – плечо пары сил (расстояние между силами N_1 и N_2); $N_1 = N_2 = \beta k l_{\phi} \tau$ – усилия сопротивления одного флангового шва.

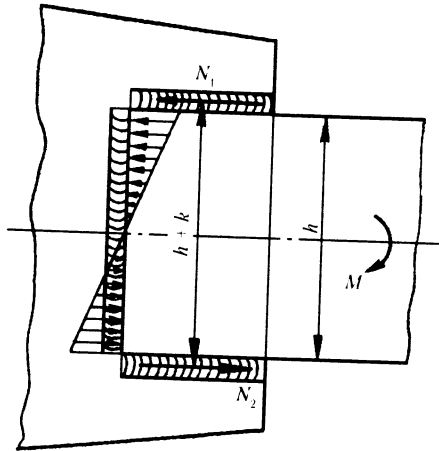


Рис. 20.6. К расчету прочности сварных нахлесточных соединений, работающих на изгиб

Сопротивление изгибу лобового шва равно моменту

$$M_{.1} = W_c \tau = \frac{\beta k h^2}{6} \tau,$$

где $W_c = \frac{\beta k h^2}{6}$ – момент сопротивления опасного сечения лобового шва.

Принимая во внимание, что $M = M_{.1} + M_{\phi}$ и допущение о равномерном распределении напряжений по опасному сечению швов, получаем следующее условие прочности:

$$\tau = \frac{M}{\beta k l_{\phi} (h+k) + \frac{\beta k h^2}{6}} \leq [\tau']. \quad (20.13)$$

Из этого условия, если задаться значением катета, можно определить длину фланговых швов и, наоборот, при заданной длине фланговых швов найти значение катета швов.

Пример: Стальная труба длиной l приварена по концам к жестким днищам и подвергается охлаждению на $T = 50^\circ\text{C}$. Внешний диаметр трубы $d_1 = 120$ мм, внутренний – $d_2 = 108$ мм. Определить требуемую величину катета углового шва (ручная электродуговая сварка), обеспечивающего прочное прикрепление, если допускаемые напряжения на срез для металла шва $[\tau'] = 100$ МПа, модуль нормальной упругости $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент теплового расширения (сжатия) $\alpha = 12,5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

Если бы труба была свободной, то при охлаждении ее длина уменьшилась бы на величину

$$\Delta l^T = -\alpha T l.$$

Но так как она закреплена, то упругая относительная деформация, вызванная реакциями в закрепленных концах при охлаждении трубы, равна

$$\varepsilon^T = \frac{\Delta l^T}{l} = \alpha T.$$

Заметим, что величина относительной деформации при охлаждении трубы не зависит от ее длины.

Напряжения, возникающие в металле трубы, соответственно, будут равны

$$\sigma^T = \varepsilon^T E.$$

В свою очередь, эти напряжения равны

$$\sigma^T = \frac{N^T}{F},$$

где N^T – реакция в закрепленных концах трубы; F – площадь поперечного сечения трубы:

$$F = \frac{\pi}{4}(d_1^2 - d_2^2).$$

Приравняв правые части выражений для σ^T и разрешив полученное выражение относительно N^T , имеем

$$N^T = \epsilon^T EF = 12,5 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot \frac{3,14}{4} (0,12^2 - 0,108^2) = 0,282 \text{ МН.}$$

На основании формулы (20.7), в которой возьмем $\beta = 0,7$ – ручная сварка, $2l_{\text{ш}} = \pi d_1$; $[\tau'] = 100$ МПа, расчетный катет

$$k = \frac{N^T}{0,7\pi d_1 [\tau']} = \frac{0,282}{0,7 \cdot 3,14 \cdot 0,12 \cdot 100} = 0,0107 \text{ м} = 10,7 \text{ мм}$$

Принимаем величину катета углового шва $k = 11$ мм.

Концентрация напряжений

В сварных соединениях распределение напряжений неравномерно – имеет место их концентрация, т. е. образование значительных напряжений на участках малой протяженности. Это обусловлено многими причинами, но прежде всего:

- наличием дефектов в сварных швах технологического и металлургического происхождения (поры, неметаллические и шлаковые включения и особенно трещины и непровары). Возле этих дефектов при нагружении силовые линии искривляются, в результате чего образуется концентрация напряжений;
- нерациональными очертаниями сварных швов. На основании данных теории упругости установлено, что очертание швов оказывает большое влияние на распределение в них внутренних сил. На металлических моделях и моделях из прозрачных материалов эти данные экспериментально подтверждены;
- нерациональными конструкциями соединений (примеры нерациональных конструкций соединений рассмотрены в следующих подразделах).

Рассмотрим распределение напряжений в пределах упругих деформаций в полосе шириной b , ослабленной круглым небольшим отверстием диаметром d (рис. 20.7, а) – возможная форма дефекта металла сварного шва.

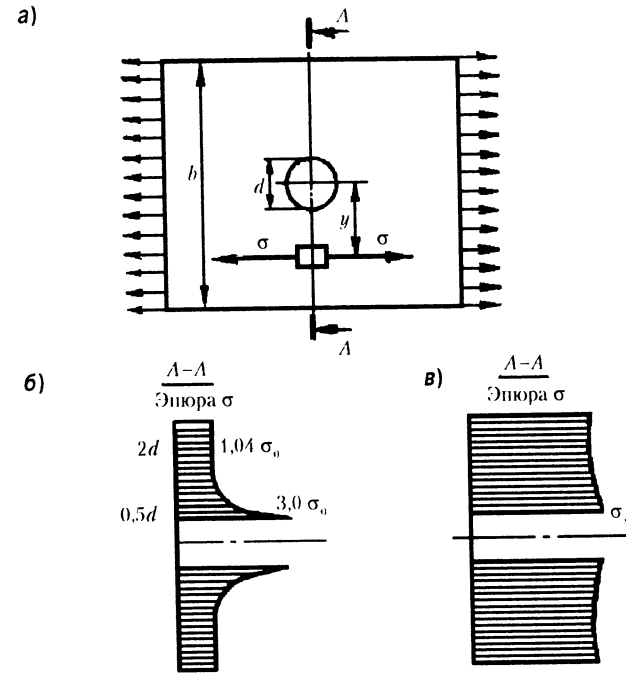


Рис. 20.7. Концентрация напряжений:

- а – полоса с круглым отверстием;
 б – распределение напряжений σ в упругой стадии нагружения;
 в – распределение напряжений σ в пластической стадии нагружения

Нормальные напряжения в поперечном сечении А-А определяются формулой

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{2} \left(2 + \frac{d^2}{4y^2} + \frac{3d^4}{16y^4} \right), \quad (20.14)$$

где σ_0 – среднее значение нормальных напряжений, определенное по формуле сопротивления материалов в ослабленном сечении.

При $y = \frac{d}{2}$ напряжения максимальны и равны: $\sigma_{\text{max}} = 3\sigma_0$, т. е. теоретический коэффициент концентрации напряжений $K_{\text{теор}} = \frac{\sigma_{\text{max}}}{\sigma_0} = 3$. При $y = 2d$ $\sigma = 1,04 \sigma_0$, т. е. значения σ приближаются к σ_0 (рис. 20.7, б).

Указанные местные напряжения в зоне концентрации не опасны для прочности в конструкциях из пластичных металлов при статических нагрузках. Вернемся к рассмотрению эпюры напряжений в полосе, ослабленной отверстием (см. рис. 20.7, б). Напряженное состояние в сечении А-А близко к одноосному. Допустим, что около отверстия напряжение σ достигло значения предела текучести металла σ_s . При дальнейшем возрастании внешней нагрузки эта зона, увеличиваясь, пластически деформируется при постоянном напряжении. Приращение нагрузки воспринимается металлом вне указанной зоны, где напряжения возрастают, т. е. в процессе нагружения эпюра напряжений меняет свою форму и выравнивается. Приблизительно можно принять, что она примет очертание, близкое к прямоугольнику (рис. 20.7, в), что и было положено в основу расчетов прочности сварных соединений при статическом нагружении.

Сглаживание эпюры напряжений в пластической стадии, рассмотренное на конкретном примере, является закономерным процессом, имеющим место во многих элементах конструкции, в том числе в местах сварных соединений из пластичных сталей (низкоуглеродистых и низколегированных) при одноосных напряженных состояниях (а иногда и многоосных).

Однако концентрация напряжений существенно снижает прочность при переменных нагрузках, а в случае ограниченной пластичности металла – и при статических нагрузках.

20.3. ХРУПКОЕ РАЗРУШЕНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В достаточно широкой практике эксплуатации сварных конструкций наблюдались как вязкие, так и хрупкие разрушения, причем в определенных условиях однотипные конструкции разрушались по-разному.

Обычно процесс вязкого разрушения происходит достаточно медленно, сопровождается значительными пластическими деформациями металла. Замечено, что для того чтобы вызвать пластическую деформацию реальной решетки металла путем сдвига по плоскостям скольжения, нужно преодолеть сопротивление сдвигу (срезу) $\tau_{ср}$. При одноосном растяжении $\tau_{ср}$ достигаются при напряжениях, равных пределу текучести металла σ_s .

Хрупкое разрушение происходит путем отрыва, причем скорость хрупкого разрушения (скорость распространения хрупкой трещины)

может, как показывают опыты, достигать очень большой величины (многих сотен метров в секунду). Столь значительная скорость распространения хрупкой трещины предопределяет, что энергия, необходимая для образования новой поверхности трещины, связана только с накопленной в металле упругой энергией. Поэтому для продвижения трещин достаточно сравнительно небольшого среднего напряжения – сопротивления отрыву $\sigma_{отр}$. Возможность возникновения хрупкого разрушения даже при малом уровне внешнего нагружения делает этот вид разрушения чрезвычайно опасным, особенно для конструкций, характеризующихся значительной жесткостью.

В соответствии с двумя видами возможного разрушения следует говорить о двух типах сопротивления металла: сопротивлению сдвигу (вязкое разрушение) и сопротивлению отрыву (хрупкое разрушение). Если в определенных условиях при растяжении раньше достигается предел текучести, то металл находится в пластичном состоянии, наоборот, если раньше достигается сопротивление отрыву, то состояние металла хрупкое. Указанные характеристики σ_s и $\sigma_{отр}$ по-разному реагируют на изменение ряда внешних и внутренних факторов.

Влияние температуры – преобладающий фактор, определяющий соотношение между величинами σ_s и $\sigma_{отр}$. Явление перехода металла при понижении температуры из пластического состояния в хрупкое получило название хладноломкости металлов. Механическое объяснение этого явления впервые дано академиком А. Ф. Иоффе и развито академиком Н. Н. Давиденковым. Согласно гипотезе Иоффе, критическая температура хрупкости определяется точкой пересечения двух кривых $\sigma_{отр}(T)$ и $\sigma_s(T)$ (рис. 20.8, а). Сопротивление отрыву практически не зависит от температуры, в то время как предел текучести с повышением температуры понижается. Из графика видно, что при высоких температурах предел текучести значительно ниже, чем сопротивление отрыву, и металл пластичен. При понижении температуры сопротивление пластической деформации значительно повышается, и при температурах ниже $T_{кр}$ сопротивление отрыву меньше значения предела текучести – металл переходит в хрупкое состояние. Разброс реальных значений от $\sigma_{отр, мин}$ до $\sigma_{отр, макс}$, определяемый вероятностным количеством дефектов в кристаллических решетках реальных металлов и сплавов, предопределяет температурный интервал от $T_{кр,н}$ до $T_{кр,в}$ перехода от вязкого разрушения к хрупкому (хрупковязкое разрушение), называемый критическим интервалом хрупкости (рис. 20.8, б).

Как следует из графиков (см. рис. 20.8), критическая температура хрупкости или критический интервал хрупкости перемещается вправо

в сторону увеличения температуры, если кривая $\sigma(T)$ сдвигается вверх или кривая $\sigma_{отр}(T)$ – вниз. Эти направленные сдвиги могут быть обусловлены:

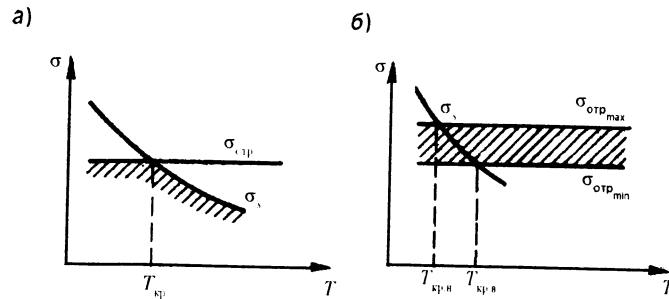


Рис. 20.8. Хладноломкость металлов:

а – схема Иоффе; б – критический интервал хрупкости

- 1) увеличением скорости деформации (динамическое нагружение), при этом растет сопротивление пластической деформации, т. е. предел текучести металла увеличивается;
- 2) наличием концентраторов напряжений. В местах концентрации напряжений происходит увеличение предела текучести металла. Это увеличение обусловлено увеличением сопротивления пластической деформации в условиях сложного напряженного состояния (двух- или трехмерного);
- 3) наличием в основном металле и металле сварного соединения внутренних дефектов (непроваров, газовых и неметаллических включений и др.), понижающих сопротивление отрыву;
- 4) укрупнением зерна, наличием ликвационных прослоек, уменьшающих межзеренную связь, т. е. снижающих сопротивление отрыву;
- 5) увеличением размеров швов и деталей. Снижение сопротивления отрыву при этом обусловлено тем, что вероятность наличия опасных дефектов, определяющих сопротивление отрыву, в больших объемах металла выше, чем в малых. Это явление носит название «масштабный фактор».

Анализируя сказанное, можно утверждать, что одни и те же металлы могут находиться в двух разных состояниях, причем аналитически оценить возможное состояние не представляется возможным. Учет влияния только отмеченных факторов в совокупности

на хрупкую прочность сварных соединений и конструкций становится чрезвычайно сложным.

Поэтому для практической оценки перехода металла в хрупкое состояние (для оценки хладноломкости основного металла и металла сварных соединений) прибегают к специальным испытаниям, оценивающим либо склонность металла к началу хрупкого разрушения, либо способность к распространению хрупкой трещины.

1. Определение порога хладноломкости путем испытаний образцов. В настоящее время имеется несколько десятков типов образцов самой разнообразной формы с различного рода надрезами, которые испытывают растяжением, изгибом, ударом и другими видами нагрузки. Широкое распространение получили испытания на ударный изгиб. Образцы для этих испытаний обычно вырезаются таким образом, чтобы вершина надреза (различной степени остроты) располагалась либо в литой зоне, либо в ЗТВ на определенном расстоянии от границы сплавления. Испытания проводят при различных, последовательно понижающихся температурах. В результате получают графики зависимости ударной вязкости КСУ (KCV) от температуры (рис. 20.9).

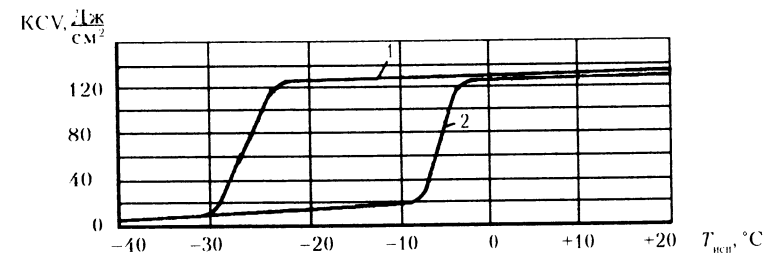


Рис. 20.9. Ударная вязкость стальных образцов в зависимости от температуры испытаний:

- 1 – малоуглеродистая сталь спокойной плавки;
- 2 – малоуглеродистая сталь кипящей плавки

Переход из пластического состояния в хрупкое проявляется в резком уменьшении энергии, затрачиваемой на разрушение образца при понижении температуры. В результате таких испытаний можно получить сравнительные характеристики сталей, отдельных зон сварного соединения в отношении их к переходу в хрупкое состояние. Однако определить температуру перехода стали, металла сварных соединений в хрупкое состояние при работе их

в конкретной конструкции в настоящее время не представляется возможным.

2. Определение температуры перехода в хрупкое состояние путем испытаний специальных образцов, имитирующих эксплуатационные разрушения материалов в пределах всей сварной конструкции. Обычно образцы для таких испытаний имеют значительные размеры и конструктивно могут повторять, например, самый жесткий фрагмент (узел) реальной сварной конструкции. В исследуемом месте делается острый надрез или инициируется предварительная трещина. Затем образец устанавливают в зажимы разрывной машины, охлаждают до определенной температуры и статически нагружают до определенного уровня напряжений в месте надреза. Последующее ударное воздействие на образец вызывает хрупкое развитие трещины. Испытания ряда образцов при различном уровне напряжений и температур позволяют построить кривые (рис. 20.10).

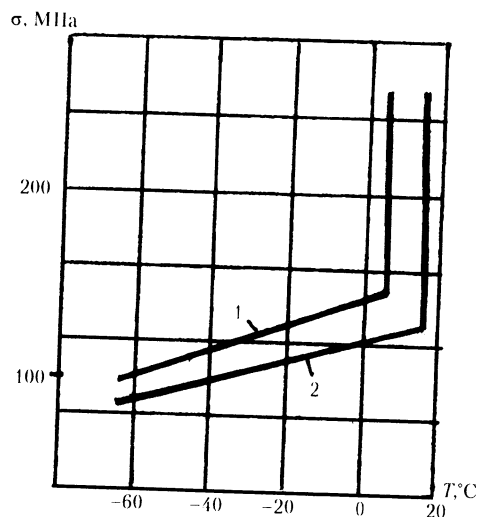


Рис. 20.10. Влияние температуры на величину минимальных разрушающих напряжений при распространении трещин:

- 1 — малоуглеродистая сталь спокойной плавки;
- 2 — малоуглеродистая сталь кипящей плавки

Область, расположенная выше и левее кривой, характеризует температуру и напряжения, при которых возникшая трещина

будет распространяться и пересечет весь образец. Область, расположенная ниже и правее кривой, характеризует температуру и напряжения, при которых однажды возникшая трещина остановится и не будет распространяться. Для каждой стали, для металла конкретного сварного соединения наблюдается характерное для них расположение такой кривой.

3. Определение чувствительности стали к ТЦ сварки. Для оценки пригодности стали для изготовления сварных конструкций применяют также комплексные методы испытаний. Цель этих методов — выбор режимов сварки, обеспечивающих получение свойств околошовной зоны, удовлетворяющих определенным требованиям, а также установление зависимости между свойствами ЗТВ и режимом сварки. В результате комплексных испытаний определяют оптимальный диапазон скоростей охлаждения околошовной зоны при сварке, в котором свойства металла благоприятны: сохраняется высокая стойкость против трещинообразования и перехода в хрупкое состояние.

20.4. ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПЕРЕМЕННЫХ (ЦИКЛИЧЕСКИХ) НАГРУЗОК

Современные методы расчета прочности изделий основаны на гипотезах непрерывности, однородности и изотропности материалов. В действительности распределение усилий между зернами металла происходит неравномерно. В некоторых зернах могут появиться местные пластические деформации. Многократное повторение пластических сдвигов в одних и тех же объемах металла приводит к появлению разрывов, т. е. образованию первичных микротрещин. При дальнейшем переменном нагружении они имеют тенденцию развиваться: сначала развитие трещин происходит очень медленно, далее постепенно ускоряется, а на последнем этапе происходит внезапное разрушение. При этом местные напряжения оказываются опасными для прочности не только хрупких, но и пластичных металлов.

В сварных изделиях вероятность зарождения первичных трещин возрастает, так как процесс сварки приводит к структурной и химической неоднородности металла, появлению дефектов металлургического и технологического происхождения, протеканию необратимых объемных изменений в металле, возникновению остаточных напряжений.

Прочность при переменных нагрузках зависит, главным образом, от числа циклов нагружения, амплитуды изменения напряжений, формы и размеров испытываемых образцов, их материала, состояния поверхности, вида нагружения (изгиб, кручение), свойств среды, в которой производятся испытания (воздух, вода и т. п.).

На рис. 20.11, а показана диаграмма прочности металла в зависимости от числа циклов нагружения N . Максимальное напряжение, при котором материал не разрушается при достаточно большом числе циклов нагружения, называется пределом выносливости или усталости. При испытаниях стальных образцов предел выносливости определяют при базовом числе циклов ($2 \cdot 10^6 \dots 10^7$). Если образец испытывают при меньшем числе нагружений, то значение разрушающих напряжений называют пределом ограниченной выносливости. На рис. 20.11, б изображена диаграмма прочности металла в зависимости от числа циклов нагружения, построенная в полулогарифмических координатах. Число циклов в логарифмическом масштабе отложено по оси абсцисс, а значение разрушающих напряжений – по оси ординат. Опытами подтверждено, что зависимость $\sigma = f(N)$ при построении в этих координатах может быть изображена двумя отрезками прямой (см. рис. 20.11, б) – наклонным и горизонтальным. Горизонтальная прямая соответствует пределу выносливости.

Предел выносливости зависит в значительной степени от характеристики цикла. Цикл – совокупность всех значений напряжений за время одного периода нагружения.

Отношение $r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ называют коэффициентом амплитуды или характеристикой цикла, где σ_{\max} и σ_{\min} – соответственно наибольшее и наименьшее напряжения цикла.

На рис. 20.12, а показана схема цикла симметричного нагружения $|\sigma_{\max}| = |\sigma_{\min}|$, на рис. 20.12, б – знакопостоянного нагружения, а на рис. 20.12, в – отнулевого. Пределы выносливости, определенные при симметричном цикле, обозначаются σ_{-1} , при отнулевом – σ_0 , при произвольном – σ_r . Характер изменения напряжений во времени бывает различным: как синусоидальным (рис. 20.12, а–в), так и другой формы (рис. 20.12, д, е).

На практике, для оценки предела выносливости при произвольном цикле часто пользуются построением диаграммы выносливости по методу Смита. Ее построение осуществляется по предварительно определенным экспериментальным значениям σ_1 , σ_2 и σ_3 (рис. 20.13). По оси абсцисс откладываются значения средних напряжений цикла

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})}{2},$$

по оси ординат – напряжения σ_{\max} и σ_{\min} . Под углом

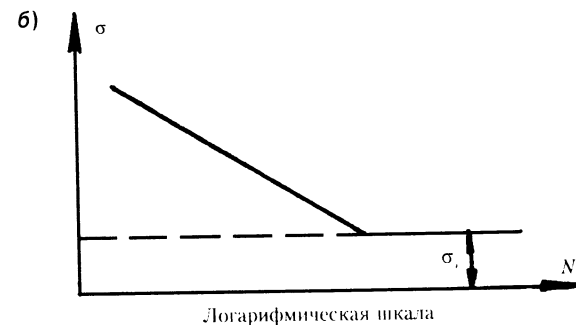
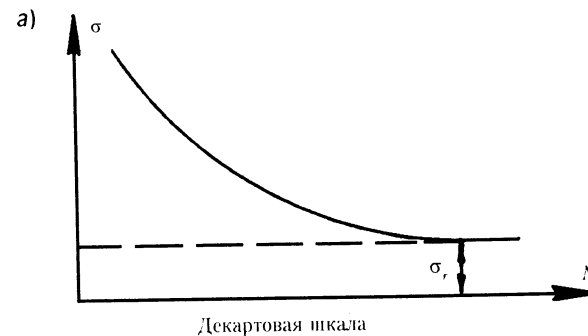


Рис. 20.11. Диаграмма выносливости стали в зависимости от числа нагружений N :

а – в декартовых координатах;
б – в полулогарифмических координатах

45° к оси абсцисс проводится прямая. Амплитуды цикла $\sigma_r = \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{2}$

откладываются симметрично относительно этой прямой. Прямые пересекаются в точке K , которая характеризует цикл с бесконечно малой амплитудой. Условно принимают, что эта точка соответствует пределу прочности σ_b . Отрезки OA и OA' выражают значение предела выносливости при симметричном цикле. При этом $\sigma_m = 0$.

В большинстве случаев пользуются участком диаграммы с напряжениями, не превышающими предела текучести σ_s . Из точки D с координатами σ_s , σ_s проводят горизонтальную прямую до пересечения с прямой AK в точке N . Эту точку проецируют на прямую $A'K$ в точку M . Ломаная линия $ANDMA'$ выражает схематизированную диаграмму выносливости в пределах упругих деформаций. Отрезок BC

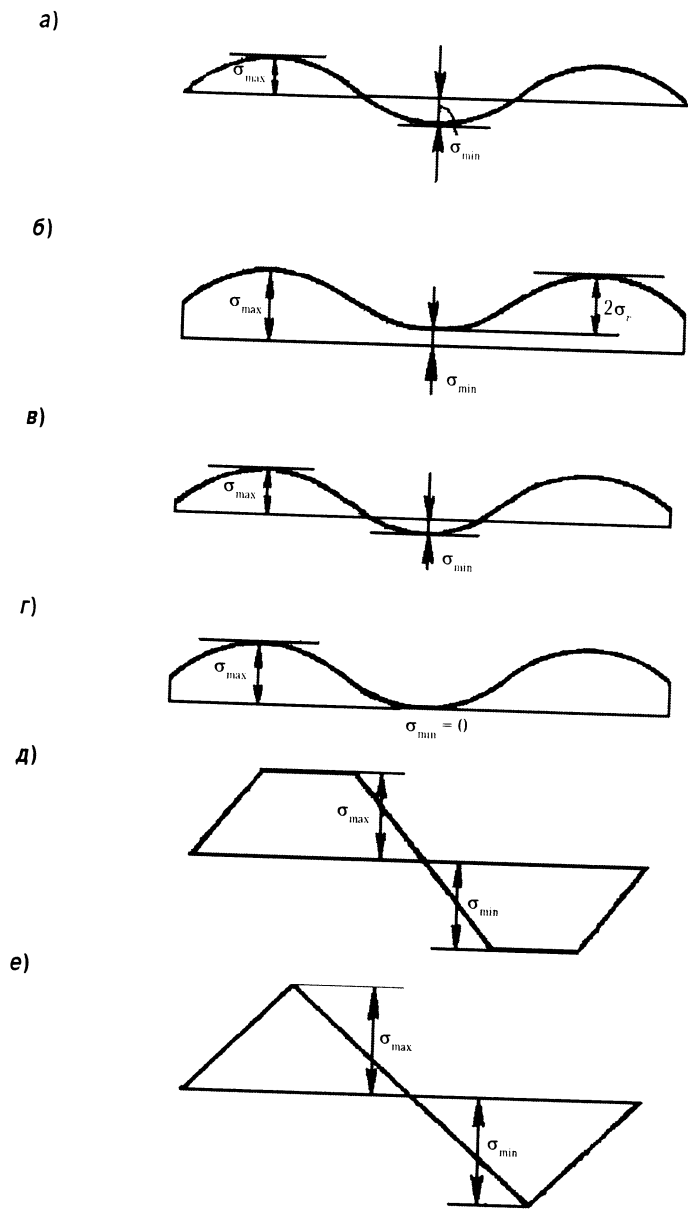


Рис. 20.12. Варианты нагружений с различными характеристиками циклов

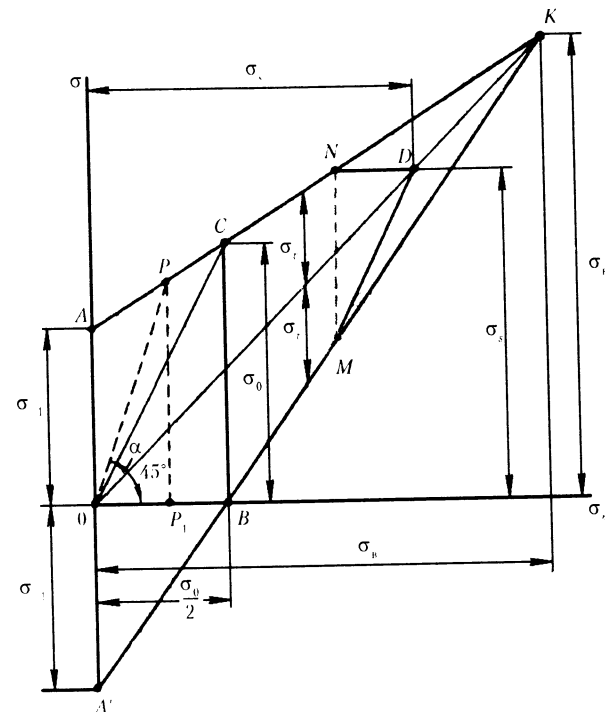


Рис. 20.13. Диаграмма выносливости в координатах σ - σ_m

выражает значение предела выносливости при отнулевом пульсирующем цикле σ_0 ; отрезок $OB = \frac{\sigma_0}{2}$.

Проведем из точки 0 прямую под произвольным углом α к оси абсцисс, тогда

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_m} = \frac{2\sigma_{\max}}{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}} = \frac{2}{1 + \left(\frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}\right)} = \frac{2}{1+r}. \quad (20.15)$$

По этому отношению для заданного цикла r определяют $\operatorname{tg} \alpha$. Точка P определяет значение предела выносливости при заданном цикле нагружения.

Отношение предела выносливости и предела текучести при испытаниях стандартных гладких образцов из низкоуглеродистых сталей на

Эффективные коэффициенты концентрации напряжений сварных соединений элементов конструкций из сталей Ст.3 и 15ХСНД

Схемы видов сварных соединений		K _э	
Вид в плане	Разрезы	Ст.3	15ХСНД
	<p>Без сварки</p> <p>Основной металл</p> <p>Стыковое соединение с обработкой стыкового шва</p>	1,0	1,0
	<p>Технологическим путем осуществлен плавный переход от шва к основному металлу</p>	1,2	1,33
	<p>Без механической обработки, обычного качества</p>	1,4	1,8
	<p>Ручная сварка</p>	1,6	2,2
	<p>Обрыв стенки</p>	2,0	2,8
		2,3 3,0	3,2 4,0
		2,5	3,5

изгиб в условиях симметричного цикла находится в пределах $\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_s} \approx (0,6...0,7)$. Для низколегированных конструкционных сталей (стали повышенной прочности) это отношение меньше, чем для низкоуглеродистых.

На усталостную прочность сварных конструкций (основного металла и металла сварных соединений) оказывает влияние большое количество как внутренних (химическая и структурная неоднородность, наличие дефектов, концентраторы напряжений и т. д.), так и внешних факторов (температура, состав среды и т. д.). Причем определяющим фактором, влияющим на усталостную прочность, является наличие концентраторов напряжений. Поэтому в инженерной практике введено понятие *эффективного коэффициента концентрации напряжений K_э*. Величина этого коэффициента определяет отношение предела выносливости гладкого образца к пределу выносливости образца с концент-

ратором напряжений при симметричном цикле: $K_{э} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1}^0} \geq 1$, причем, чем ближе K_э к единице, тем лучше работает изделие (табл. 20.2). У хрупких материалов эффективный коэффициент концентрации напряжений K_э близок к теоретическому K_{теор}, у пластичных он значительно меньше.

Экспериментально установлено, что при значениях r, близких к единице, концентрация напряжений не оказывает существенного влияния на предел выносливости. С уменьшением r влияние концентраторов на понижение предела выносливости растет, наибольшего значения эффективный коэффициент концентрации напряжений K_э достигает при r = -1.

Сопротивляемость сварных соединений нагружениям при низкой частоте (несколько циклов в минуту, в час, в сутки) заметно ниже, чем при испытаниях с высокой частотой. Низкочастотные нагрузки снижают прочность всех видов материалов и сварных соединений. Низкочастотным нагружениям подвержены конструкции надводных и подводных судов, резервуарно-котельные установки. Низкочастотные колебания нагрузки, модулированные более высокой частотой, особенно резко снижают усталостное сопротивление сварных конструкций.

Расчет сварных соединений на выносливость отличается от расчета прочности при статическом нагружении тем, что допускаемые напряжения для основного металла и металла сварных швов понижаются: $[\sigma]_p \eta$, где η – коэффициент понижения допускаемых напряжений при переменных нагружениях по сравнению со статическими:

Схемы видов сварных соединений		K_2	
Вид в плане	Разрезы	Ст.3	15ХСНД
		3,4	4,4
		4,0	4,9

$$\eta = \frac{1}{(\rho K_2 \pm \Delta) - (\rho K_2 \mp \Delta)r} \quad (20.16)$$

где ρ , Δ – коэффициенты, значения которых зависят от марки стали и назначения конструкции ($\rho = 0,6...0,8$; $\Delta = 0,2...0,3$); r – характеристика цикла.

Верхние знаки в формуле (20.16) следует принимать для случая, когда наибольшие по величине напряжения – растягивающие, нижние – сжимающие.

Таким образом, при расчете прочности сварных соединений на выносливость принимают во внимание характеристику цикла r и концентрацию напряжений в районе сварного соединения (коэффициент K_2), т. е. учитывают лишь два, но самых значительных фактора, оказывающих наибольшее влияние на усталостную прочность.

Анализируя формулу (20.16), видим, что коэффициент η имеет наименьшее значение при $r = -1$. Если коэффициент η , вычисленный по этой формуле, получается больше единицы, то, разумеется, увеличивать допускаемое напряжение не следует.

Повышение усталостной прочности сварных соединений и конструкций является комплексной проблемой: создание надежных сварных конструкций требует тщательного учета конструктивных особенностей самой конструкции, правильного выбора основного металла, назначаемых процессов сварки и сварочных материалов, выбора рациональной технологии сборки и сварки и точного ее соблюдения.

Ниже дано несколько рекомендаций и приведены примеры повышения усталостной прочности сварных соединений и узлов конструкций.

1. Рациональный выбор материала конструкции. Стали повышенной прочности наиболее целесообразно использовать в условиях статических и переменных нагрузок при $r > 0$. Если значения эффективных коэффициентов концентрации напряжений сварных соединений в конструкции высоки и конструкция подвержена переменному нагружению, то при $r \rightarrow -1$ эффективность применения высокопрочных сталей резко понижается. В этом случае пределы выносливости для сталей с совершенно различными значениями пределов прочности почти не отличаются.
2. Рациональное проектирование сварных соединений с целью уменьшения концентрации напряжений (рис. 20.14). Плавное сопряжение наплавленного металла с основным на границе сплавления в некоторых случаях может быть достигнуто (помимо механической обработки) обработкой швов аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом с присадкой или без присадки (выполнение «галтельных» швов – рис. 20.15).

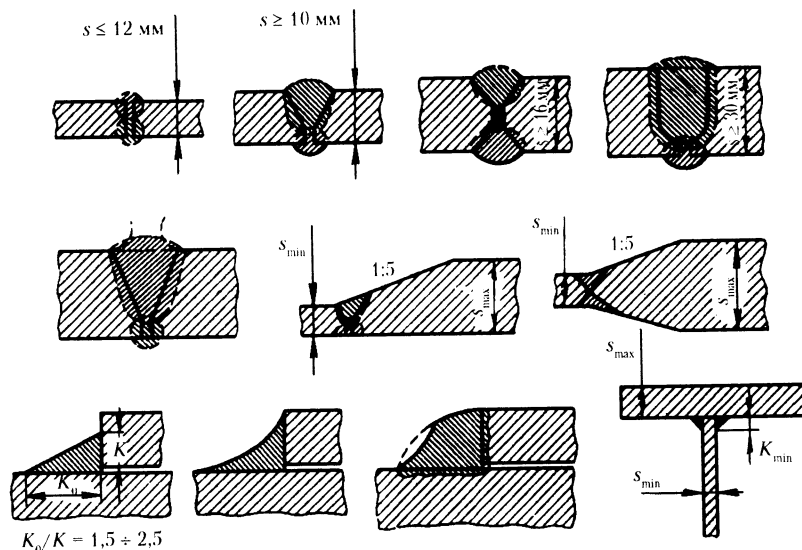


Рис. 20.14. Рекомендуемое оформление соединений со стыковыми и угловыми швами, работающих под переменными нагрузками

3. Рациональный выбор процессов сварки. Значения пределов выносливости сварных соединений, выполненных автоматической

сваркой, более стабильны. Это объясняется более высоким качеством металла шва (его плотностью, меньшей дефектностью) и меньшей вероятностью проявления концентрации напряжений как по длине, так и по сечению сварного соединения (непровары, подрезы, зашлаковка и т. п.).

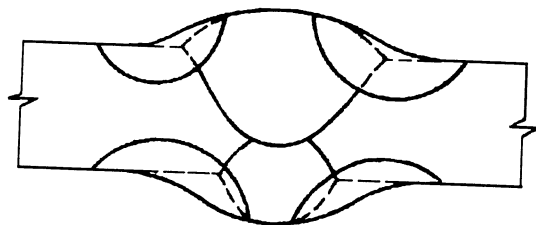


Рис. 20.15. Улучшение формы стыковых соединений наложением «галтельных» швов

4. Рациональное проектирование сварных узлов и элементов конструкции с целью уменьшения концентрации напряжений. На рис. 20.16 показаны варианты приварки планок к листовым элементам; указаны пределы выносливости при симметричном

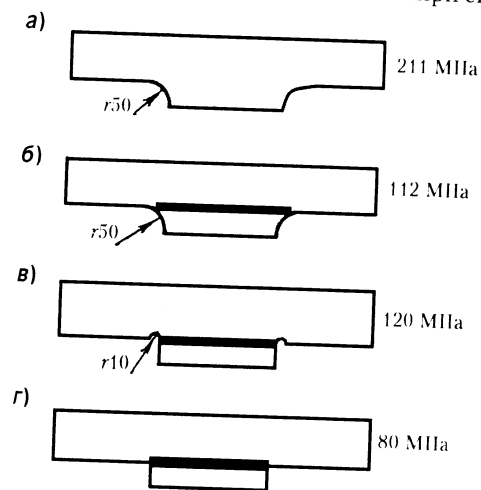


Рис. 20.16. Влияние конструктивного оформления элемента конструкции на усталостную прочность:

а – выкружка в целом элементе полосы; *б* – выкружка в приваренном элементе; *в* – деконцентратор; *г* – швы без отработки

цикле σ_r . При отсутствии выкружки (рис. 20.16, *г*) предел выносливости существенно снижается. Следует избегать скученности сварных швов, которая может способствовать высокой концентрации напряжений, а также образованию плоского напряженного состояния. Примеры правильного разнесения сварных швов различного направления при наличии деконцентраторов показаны на рис. 20.17.

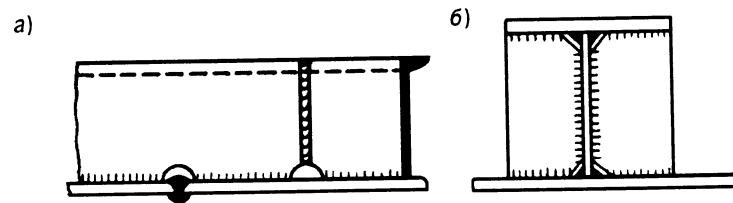


Рис. 20.17. Рациональное оформление мест пересечения швов различного направления в районах высоких рабочих напряжений:

а – место расположения трех швов разных направлений: стыкового шва полотно-ца, стыкового шва набора и углового шва приварки набора к полотнищу; *б* – место пересечения криволинейных швов с поясными швами балки

5. Следует иметь в виду, что все способы предотвращения, уменьшения и устранения остаточных сварочных напряжений повышают усталостную прочность.

20.5. КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И КОНСТРУКЦИЙ

Коррозия – это процесс разрушения металлов в результате взаимодействия их с внешней средой. Термин *ржавление* применим только к коррозии железа и его сплавов с образованием продуктов коррозии, состоящих в основном из гидратированных оксидов железа. Другие металлы и их сплавы, следовательно, корродируют, но не ржавеют.

Различают химическую и электрохимическую коррозию. Химическая коррозия возникает при воздействии на металл агрессивных веществ (жидких, газообразных) обычно при высоких температурах. Примером такой коррозии является окисление раскаленного железа в воздухе, сопровождаемое образованием слоя окалины. Электрохимическая кор-

розия возникает при контакте металлов с электропроводящей жидкостью – электролитом (кислотами, щелочами, водными растворами; агрессивной средой является и морская вода).

Как правило, коррозионные процессы являются электрохимическими, именно по этому механизму корродируют основной металл и сварные соединения судов. Электрохимическая коррозия – сложный процесс, сопровождаемый развитием окислительно-восстановительных реакций на поверхностях соприкосновения металла с электролитом. Развитие этих реакций обуславливает появление электрических токов. Здесь уместна аналогия с гальваническим элементом, представляющим собой систему из двух разнородных электрических проводников (электродов), погруженных в электролит. Гальванический элемент преобразует химическую энергию в электрическую.

Существуют три основных типа элементов, принимающих участие в коррозионных процессах.

1. Элемент с разнородными электродами – система из двух разнородных электродов, погруженных в электролит. Примерами таких элементов являются:

- бронзовый винт судна, контактирующий со стальным корпусом судна;
- нагартованный металл в контакте с таким же отожженным металлом;
- граница зерна металла в контакте с самим зерном;
- монокристаллы разной ориентации и др.

Следует заметить, что любая поверхность металла с вкраплениями примесей представляет собой совокупность электродов, замкнутых между собой через основной металл. Локальные токи и коррозия не возникают, пока металл остается сухим. При погружении металла в воду или водные растворы локальные электроды начинают функционировать, что сопровождается превращением металла в продукты коррозии.

2. Концентрационный элемент – система двух одинаковых электродов, контактирующих с растворами разных составов. Из возможных типов концентрационных элементов, имеющих большое практическое значение, следует выделить элемент дифференциальной аэрации. Примером может служить элемент из двух железных электродов, погруженных в разбавленный раствор хлористого натрия NaCl, причем у одного электрода электролит интенсивно насыщается воздухом, а у другого – деаэрируется азотом. Различие в концентрации кислорода сопровождается возникновением разности потенциалов, что обуславливает протекание тока. Возникновение элемента этого вида вызывает разрушения в щелях (щеле-

вая коррозия), образующихся на стыках труб или в резьбовых соединениях, поскольку концентрация кислорода в щелях ниже, чем снаружи. Этим также объясняется язвенное разрушение под слоем ржавчины (рис. 20.18, а) или коррозия на границе раздела раствор-воздух (рис. 20.18, б). Доступ кислорода к участкам металла, покрытым ржавчиной или другими твердыми продуктами коррозии, затруднен по сравнению с участками, покрытыми тонкими пленками или свободными от них.

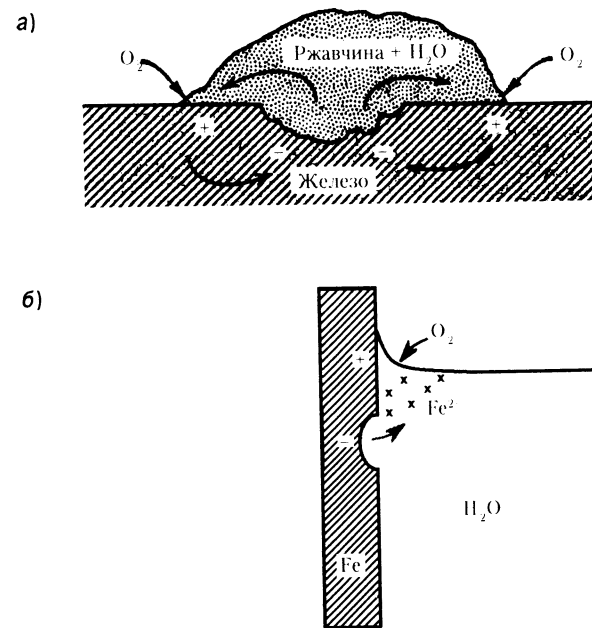


Рис. 20.18. Примеры элементов дифференциальной аэрации:

- а – коррозия под слоем ржавчины;
б – коррозия на ватерлинии

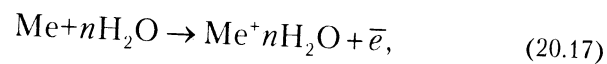
Элементы дифференциальной аэрации часто являются причиной язвенной или щелевой коррозии нержавеющей сталей, алюминия, никеля и других пассивных металлов в водных средах, например в морской воде.

2. Термогальванический элемент – система двух одинаковых электродов, но имеющих разную температуру, контактирующих с электролитом одинакового состава. Эти элементы возникают в теплообменниках, паровых котлах, погруженных нагревателях и аналогичном оборудовании.

На практике коррозия может быть связана с элементами всех трех типов.

Для любого гальванического элемента процесс коррозии характеризуется двумя процессами – анодным и катодным. Начальный потенциал анода – отрицательный, катода – положительный.

Электрод, на котором происходит окисление, т. е. электроны поступают из раствора в электрод, называется анодом:



где Me – атом металла; H_2O – молекула воды; $\text{Me}^+ n\text{H}_2\text{O}$ – гидратированный ион металла; \bar{e} – свободный электрон.

Реакция (20.17) – это реакция окисления в химическом смысле. Коррозия металлов протекает именно на аноде: в электролит поступают положительно заряженные гидратированные ионы металла.

Электрод, на котором протекает реакция восстановления, т. е. электроны из металла переходят в раствор, называется катодом:



где D^+ – ион.

Реакция (20.18) – это реакция восстановления в химическом смысле.

Проиллюстрируем вышесказанное схемой (рис. 20.19) коррозии в морской воде корпусной стали, имеющей поверхностный слой окалины, являющийся катодом по отношению к стали. В этом случае в прианодной области образуются, согласно реакции (20.17), положительные ионы железа Fe^{2+} . Освободившиеся электроны \bar{e} внутри металла переходят от анода к катоду. Находящиеся в морской воде положительные ионы водорода H^+ стремятся разрядиться на катоде с образованием H_2 , а отрицательные ионы OH^- , Cl^- перемещаются к аноду, где они соединяются с ионами железа Fe^{2+} , образуя соответственно $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, FeCl_2 , FeCl_3 (гидроксиды и хлориды железа).

Интенсивность коррозионных процессов существенно зависит от разности электродных потенциалов элемента, так как эта разность определяет величину коррозионного тока, т. е. характеризует интенсив-

ность протекания реакции (20.17). Для оценки коррозионной стойкости металлов в воде используются значения так называемых стандартных электродных потенциалов, которые образуют металлы в паре с водородом (электродный потенциал водорода условно принят равным нулю).

Металл	Стандартный потенциал E° , В
Серебро	0,800
Медь	0,337
Водород	0
Свинец	-0,126
Никель	-0,250
Железо	-0,440
Хром	-0,740
Цинк	-0,763
Марганец	-1,18
Титан	-1,63
Алюминий	-1,66
Магний	-2,37

Более отрицательные значения потенциалов соответствуют более реакционноспособным металлам. Из двух металлов, составляющих элемент, анодом будет более активный, т. е. металл с наименьшим (более отрицательным) электродным потенциалом.

В реальных условиях механизм коррозионного разрушения металлов очень сложен и требует фундаментальных исследований конкретных коррозионных проблем, изучения электрохимических кинетик процессов. В настоящем подразделе указаны только некоторые общие сведения, позволяющие судить о коррозии металлов.

Разность электродных потенциалов гальванопары не остается постоянной в процессе коррозии в связи с так называемой поляризацией (торможением) процесса электрохимической коррозии. Поляризацией коррозионного процесса называют уменьшение начальной разности потенциалов коррозионной пары либо за счет смещения потенциала анода в положительную сторону (анодная поляризация), либо – катода в отрицательную сторону (катодная поляризация). Характерным примером анодной поляризации является образование защитных барьерных (пассивных) пленок на поверхности некоторых металлов (нержавеющая сталь, алюминий и др.).

Скорость равномерной коррозии обычно измеряют уменьшением толщины элементов за год [мм/год], в отдельных случаях – потерей массы металла с единицы площади за час [г/(м²·ч)]. Металлы, у кото-

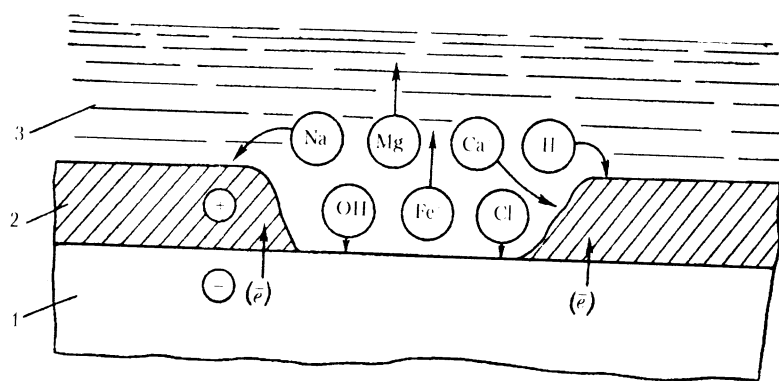


Рис. 20.19. Схема коррозионного процесса корпуса судна в морской воде (стрелками показано направление движения ионов и электронов):

1 – металл корпуса; 2 – окатина; 3 – морская вода

рых скорость коррозии не превышает 0,15 мм/год. относят к группе металлов, обладающих высокой коррозионной стойкостью, вследствие чего они пригодны для ответственных изделий и конструкций (конструкционные стали: ВСтЗсп – 0,13 мм/год, 10ХСНД – 0,10 мм/год). Металлы, у которых скорость коррозии более 1,5 мм/год, как конструкционные материалы не используются.

В зависимости от характера коррозионных разрушений элементов конструкций корпуса судна из углеродистых и низколегированных сталей, контактирующего с забортной водой и водовоздушными смесями в надводных его частях, различают общую или равномерную коррозию, заключающуюся в более или менее одинаковом разрушении поверхностей листов (лишенных защитного покрытия), и местную коррозию, при которой разрушения сосредотачиваются на небольших поверхностях.

Осмотры корпусов судов при доковых ремонтах показывают, что максимальные коррозионные разрушения корпуса и сварных соединений наблюдаются в зоне переменной ватерлинии. Коррозионные разрушения в подводной части корпуса несколько ниже, но и они достигают часто значительных величин. Характерно, что наибольшие коррозионные разрушения наблюдаются на пазовых (горизонтальных) швах, особенно при выполнении их ручной дуговой сваркой покрытыми электродами. Стыковые швы (вертикальные), как правило, имеют точечноязвенные поражения. Процесс коррозии сварных соединений

корпуса судна в междукоковый период может быть условно разделен на четыре этапа (рис. 20.20):

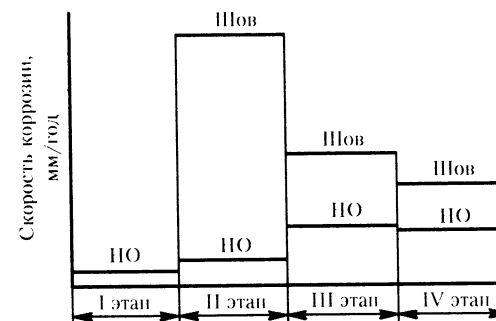


Рис. 20.20. Схема изменения скорости коррозии наружной обшивки корпуса судна и сварных швов в междукоковый период

I – скорость коррозии очень низка, так как лакокрасочное покрытие полностью защищает корпус судна;

II – скорость коррозии сварных швов значительно возрастает, так как здесь, как правило, начинается разрушение лакокрасочных покрытий;

III – скорость коррозии сварных швов несколько снижается, при этом возрастает скорость коррозии основного металла, что связано со значительным разрушением лакокрасочных покрытий;

IV – скорость коррозии корпуса снижается в связи с обрастанием обшивки корпуса судна.

Основными видами коррозионного разрушения сварных соединений являются:

- равномерный износ сварного соединения (скорость коррозии всех зон сварного соединения одинакова);
- усиленный износ металла сварного шва (равномерный – рис. 20.21, а; локальный – рис. 20.21, б);
- усиленный износ ЗТВ (ножевая коррозия – рис. 20.21, в);
- усиленный износ основного металла вблизи ЗТВ (рис. 20.21, г, д).

Виды коррозионных разрушений сварных соединений тесно связаны с термодинамической нестабильностью зон сварных соединений. Равномерный износ сварного соединения происходит в случае, когда потенциалы всех зон сварного соединения одинаковы, – это идеальный случай коррозии сварного соединения. Наиболее распространенным видом

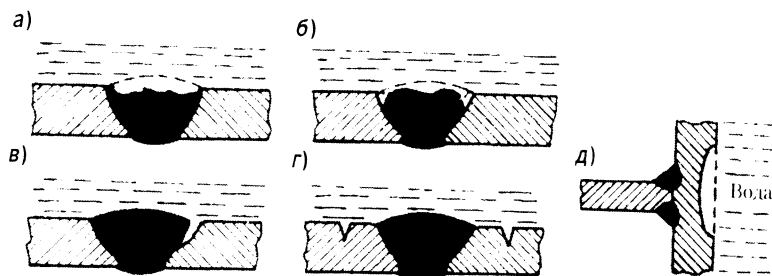


Рис. 20.21. Коррозионные разрушения сварных соединений наружной обшивки корпуса судна

коррозии сварного соединения является усиленный износ металла сварного шва. Он характерен для сварного соединения, у которого потенциал сварного шва более отрицателен, чем потенциал основного металла. Усиленный износ металла ЗТВ при коррозии сварных соединений корпусов морских судов начал наблюдаться с тех пор, как корпуса изготавливаются из стали 09Г2. Аналогичные явления с несколько меньшей глубиной разрушения наблюдаются и на углеродистых сталях при применении для сварки электродов, легирующих металл шва хромом. Причинами усиленного разрушения металла ЗТВ и вне ее являются также специфическая структура отдельных зон, наличие разупрочненной зоны и значительные остаточные сварочные напряжения растяжения во всех зонах сварного соединения.

Нельзя забывать, что интенсивность возможных коррозионных разрушений зависит и от многих других факторов (местных и внешних). Приведем некоторые примеры:

- неудовлетворительная поверхностная очистка листов наружной обшивки корпуса, наличие поверхностных пленок: как уже отмечалось, окалина по величине потенциала – катод, места, свободные от окисления, например сварные швы, – аноды; следовательно, разрушаться будут швы;
- неудовлетворительное выполнение лакокрасочных работ: естественно, что коррозионные разрушения будут развиваться в тех местах корпуса судна, на которых защитное покрытие разрушено, а это, в свою очередь, может предопределить соотношение площадей анодных и катодных участков: чем больше площадь катодных участков (например, на основном металле) и чем меньше площадь анодных участков (например, металл шва), тем больше коррозионные разрушения анодных участков, т. е. сварных швов;
- усиление движения воды (турбулентация обтекающего потока)

усиливает отвод продуктов коррозии от поверхности металла и тем самым ускоряет коррозию;

- повышение температуры воды (в тропических зонах) сопровождается усилением диффузионных процессов, ускоряющим отвод продуктов коррозии и, соответственно, коррозию;
- наложение постоянного тока извне, например при сварочных работах наплаву, когда сварочный источник на берегу, а обратным проводом служит морская вода; этот вид коррозии крайне опасен, так как интенсивность коррозионного разрушения корпуса резко возрастает.

Вопросы, связанные с защитой судовых конструкций и сварных соединений от коррозии путем использования лакокрасочных покрытий, методов катодной защиты, рассматриваются в дисциплинах материаловедения и технологии судостроения. Ниже рассмотрены только общие направления повышения коррозионной стойкости, связанные с изготовлением судовых конструкций.

1. Предварительная подготовка элементов (листов, проката и пр.), поставляемых на сборку и сварку узлов и секций. Если на поверхности листов остается слой прокатной окислы, то, с точки зрения коррозионной стойкости металла сварных швов, создаются неблагоприятные условия. В этом случае металл шва будет являться анодом и коррозионные разрушения его будут особенно интенсивными. Для удаления с элементов окислы, образующейся при прокате, термической обработке, применяется дробеметная очистка, после которой поверхности элементов подвергаются пассивированию в специальных реактивах.
2. Регулирование химического состава металла шва. Следует иметь химический состав металла шва таким, чтобы его электродный потенциал был равен или был незначительно выше потенциалов основного металла и металла ЗТВ. В этом случае шов будет являться катодом. Даже маленькая степень отрицательности электродного потенциала шва недопустима, так как это приведет к интенсивному коррозионному разрушению металла шва. Высокий электродный потенциал металла шва также недопустим, так как это обусловит интенсивное разрушение ЗТВ.

Необходимый уровень электродного потенциала металла шва достигается его легированием никелем, медью, молибденом. Обычно для сварки малоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей используются присадочные материалы, легированные никелем и медью, наиболее эффективно легирование металла шва никелем в пределах (0,7...1,1)%.

С этой целью для ручной электродуговой сварки наружных слоев (швов, проходов) обшивки корпуса, а также для подварки прокорродировавших швов корпуса (при ремонтных работах) из сталей ВСтЗсп, 09Г2, 10ХСНД, 12Г2СНД и др. следует рекомендовать электроды марок Э-138/45Н и Э-138/50Н. Они обеспечивают следующий состав наплавленного металла: С ≤ 0,11%, Si = (0,15...0,35)%, Mn = (0,35...0,65)%, Ni = (0,7...1,1)%.

При механизированной сварке аналогичных сталей под флюсами ОСЦ-45, АН-348А и подобных им необходимый уровень электродного потенциала металла шва достигается применением сварочной проволоки марки Св-08ГН.

Для сварки в углекислом газе можно рекомендовать сварочную проволоку марки Св-08ГСНТ.

3. Швы, обращенные в сторону будущей коррозионной среды, в сварных судовых конструкциях (секциях) следует выполнять в последнюю очередь. Они должны иметь равномерное очертание по длине при минимальной высоте усиления (для лучшего сохранения лакокрасочных покрытий). Рекомендуется применение механизированных способов сварки, в частности, автоматической сварки под флюсом, полуавтоматической сварки порошковыми проволоками в защитном газе (смесь Ar и CO₂), обеспечивающими более плотный и термодинамически более стабильный металл шва.
4. Следует помнить, что остаточные сварочные растягивающие напряжения ускоряют процессы общей и местной коррозии. А для некоторых конструкционных материалов (высокопрочные стали, высоколегированные стали) возникает опасность коррозионного разрушения в виде трещин – коррозионное растрескивание под напряжением (КРН).

20.6. ВЛИЯНИЕ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И КОНСТРУКЦИЙ

Процесс сварки сопровождается развитием в металле сварных соединений необратимых объемных изменений, в результате которых в конструкциях возникают остаточные деформации и напряжения. Являясь собственными напряжениями, т. е. уравновешенными в любых сечениях сварной конструкции, они имеют специфический уровень и распределение (см. подразд. 17.2).

На основании многочисленных экспериментальных и теоретических исследований сложились следующие представления о распределении остаточных продольных напряжений σ_x в стыковых однопроходных соединениях, выполненных электродуговой сваркой. В перлитных и аустенитных сталях, а также в титановых сплавах, структурные превращения в которых либо вовсе не происходят, либо завершаются при высоких температурах, когда металл находится в разупрочненном состоянии, характер распределения остаточных напряжений одинаков. Максимальные растягивающие напряжения действуют в шве и околошовных зонах: в низкоуглеродистых и аустенитных сталях $\sigma_{x_{max}} \approx \sigma_s$ (рис. 20.22, а, б), в титановых сплавах (рис. 20.22, в) $\sigma_{x_{max}} \approx (0,5...0,8)\sigma_s$.

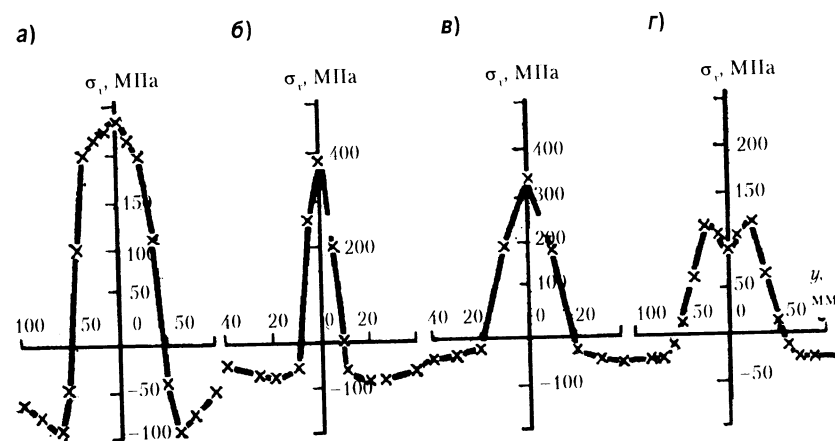


Рис. 20.22. Распределение остаточных продольных напряжений σ_x в стыковом сварном соединении (по литературным данным):

а – малоуглеродистая сталь ($s = 8$ мм); б – аустенитная сталь 12Х18Н9Т ($s = 2$ мм); в – титановый сплав ОТ4 ($s = 1,5$ мм); г – алюминиевый сплав АМг-6 ($s = 10$ мм)

В алюминиевых сплавах в средней части наблюдается характерный «седлообразный» вид эпюры (рис. 20.22, г) – $\sigma_{x_{max}} \approx (0,6...0,8)\sigma_s$. Растягивающие напряжения уравновешены сжимающими напряжениями в основном металле, величина которых определяется действительными деформациями. Представленные эпюры остаточных продольных напряжений σ_x действуют по всей длине швов, за исключением концевых участков.

Структурные превращения, происходящие в металлах при температурах значительно меньших, чем температура разупрочнения металла, когда $\sigma_s \neq 0$, оказывают влияние на величину и распределение продольных остаточных напряжений σ_x . Чем ниже температура структурных превращений (появление неравновесных мартенситоподобных структур), тем меньше в зоне превращений растягивающие напряжения σ_x . При низких температурах превращений (ниже 300 °С) возникают сжимающие напряжения. На рис. 20.23, а показано типичное распределение напряжений σ_x в среднелегированной стали (высокопрочные стали). Вне зоны сжимающих напряжений действуют растягивающие напряжения (пики напряжений), по величине равные $(0,6...0,9)\sigma_s$. В легированных сталях, сваренных аустенитным присадочным металлом (рис. 20.23, б), в шве напряжения σ_x растягивающие и равные σ_s аустенита, в околшовных зонах в пределах зон, где произошли структурные превращения, σ_x сжимающие. По краям зоны пластических деформаций напряжения σ_x растягивающие, равные по величине $(0,6...0,9)\sigma_s$ основного металла.

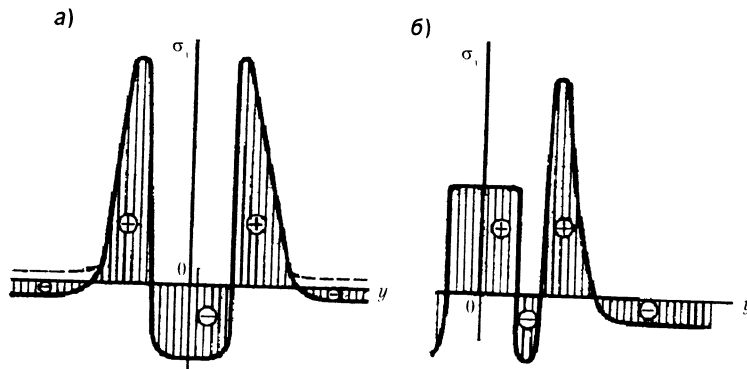


Рис. 20.23. Характер распределения остаточных продольных напряжений σ_x в однопроходных сварных соединениях сталей повышенной прочности (среднелегированных), претерпевающих структурные превращения:

- а – присадочный металл совпадает с основным металлом;
- б – присадочный металл – аустенитная сталь

Поперечные напряжения σ_y в электродуговых однопроходных сварных соединениях малы, по величине не превышают $0,3 \sigma_{x, \max}$, если жесткость свариваемого элемента в поперечном направлении незначительна (в противном случае – см. подразд. 19.3).

При внешнем нагружении происходит взаимодействие (суммирование) сварочных напряжений и напряжений от внешнего нагру-

жения. Вопрос о влиянии только остаточных сварочных напряжений на прочность и долговечность сварных соединений и конструкций не всегда однозначен, так как процесс сварки сопровождается не только возникновением остаточных напряжений, но и возможным существенным изменением структуры и свойств металла в сварном соединении, кроме того, сам шов, как правило, является концентратором напряжений. Оценить влияние всех факторов в совокупности на прочность и работоспособность сварных соединений и конструкций можно только в результате экспериментальных исследований. Однако некоторые моменты о влиянии остаточных сварочных напряжений на работоспособность конструкций достаточно изучены и подтверждены экспериментами.

Влияние остаточных сварочных напряжений на прочность сварных соединений при статическом нагружении

Рассмотрим образец – балку-полоску сечением $(B \times s)$ с центральным продольным швом. Распределение остаточных продольных сварочных напряжений в сечении образца показано на рис. 20.24, а: в центральной зоне f_A (площадь активной зоны F) действуют растягивающие напряжения σ_A , величина которых равна пределу текучести металла: $\sigma_A = \sigma_s$; в периферийной зоне f_B действуют уравновешивающие сжимающие напряжения σ_B , по величине равные:

$$\sigma_A f_A + \sigma_B f_B = 0; \quad \sigma_B = \sigma_s \frac{f_A}{f_B} = \sigma_s \frac{f_A}{f_B}. \quad (20.19)$$

На схематизированной диаграмме растяжения-сжатия металла (рис. 20.24, б) зафиксированы точки А и В, соответствующие этим напряжениям. Внешним нагружением вызовем в образце растягивающие напряжения, по величине равные $\sigma'_{\text{нп}}$, а затем удалим их.

Процесс нагружения и последующего разгружения образца проследим по диаграмме (рис. 20.24, б), на которой по оси абсцисс откладываются напряжения от внешнего нагружения $\sigma'_{\text{нп}}$, а по оси ординат – действующие в образце напряжения σ_x , определяемые суммой напряжений: сварочных и от внешнего нагружения.

В случае, если в образце нет остаточных сварочных напряжений, действующие напряжения изменяются в соответствии с изменением $\sigma'_{\text{нп}}$ по прямой линии 0–А вплоть до предела текучести металла σ_s (точка А).

При наличии в образце начальных напряжений ($\sigma_A = \sigma_s$ в зоне f_A и σ_B в зоне f_B) действующие напряжения в образце при нагружении будут изменяться иначе. В зоне f_A они не изменятся и останутся рав-

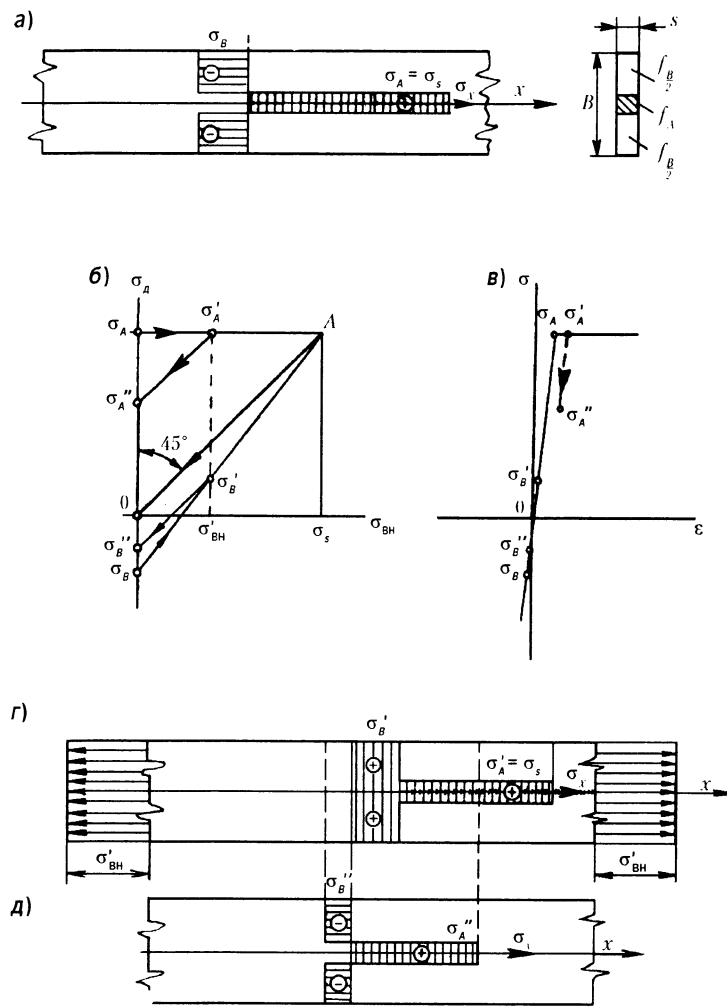


Рис. 20.24. Взаимодействие остаточных сварочных продольных напряжений с напряжениями от внешней статической нагрузки:

a – эпюра остаточных сварочных продольных напряжений в балке-полоске с центральным швом (исходное состояние); *б* – диаграмма изменения продольных напряжений в зонах f_A и f_B при нагружении; *в* – изменение продольных напряжений в зонах f_A и f_B при нагружении на диаграмме σ – ε ; *г* – эпюра продольных напряжений при внешнем статическом нагружении $\sigma_{\text{вн}}$; *д* – эпюра продольных напряжений при снятии статического нагружения

ными σ_A' . В зоне f_B напряжения при нагружении будут возрастать быстрее (по линии σ_B – A до точки σ_B'), так как зона f_A при растяжении не участвует в восприятии внешней нагрузки. В этой зоне (зоне f_A) процесс внешнего нагружения сопровождается протеканием пластических деформаций растяжения: на диаграмме σ – ε (рис. 20.24, *в*) участок σ_A – σ_A' .

Эпюра продольных напряжений в результате взаимодействия (суммирования) остаточных сварочных напряжений и напряжений от внешнего нагружения представлена на рис. 20.24, *г*.

При снятии внешнего нагружения весь образец, включая зону f_A , будет разгружаться упруго. Поэтому процесс снятия напряжений будет характеризоваться линиями σ_A' – σ_A'' и σ_B' – σ_B'' , параллельными линии O – A .

Как следует из диаграммы, процесс приложения внешнего нагружения, вызвавший пластические деформации растяжения в зоне f_A , после снятия нагружения приводит к уменьшению остаточных напряжений до величин σ_A'' в зоне f_A и σ_B'' в зоне f_B . На рис. 20.24, *б, в* показано изменение деформаций и напряжений в зонах f_A и f_B для рассматриваемого случая, а на рис. 20.24, *д* – эпюра продольных напряжений после снятия нагружения.

Очевидно, что в случае, когда $\sigma_{\text{вн}} = \sigma_s$, после снятия нагружения остаточные напряжения будут равны нулю, так как процесс нагружения будет идти по линии σ_A – A для зоны f_A и по линии σ_B – A для зоны f_B , а процесс разгрузки для обеих зон – по линии A – O . Проследивая в этом случае за изменением деформаций и напряжений по диаграмме σ – ε (см. рис. 20.24, *в*), можно видеть, что после снятия внешнего нагружения в зоне f_A пластические деформации растяжения по величине достигли значения σ_s , а в зоне f_B пластических деформаций не наблюдалось.

На основании схематизированного рассмотрения процесса нагружения балки-полоски со сварным швом и его последующего разгрузки можно сделать следующие выводы:

- приложение внешней нагрузки вызывает перераспределение внутренних напряжений в балке и сопровождается пластическими деформациями растяжения в активной зоне;
- после снятия внешней нагрузки балка остается удлиненной, а внутренние напряжения в ней уменьшаются;
- если при внешнем нагружении балки напряжения по всему ее сечению достигли предела текучести, то после снятия нагружения внутренних напряжений в балке не остается, так как в зоне f_A при нагружении возникли пластические деформации растяже-

ния, равные по величине σ , в результате чего стремление этой зоны к сокращению исчезло.

Для полного снятия напряжений величина пластической деформации растяжения в активной зоне составляет для малоуглеродистых и низколегированных сталей 0,12...0,15%, что соответствует деформации σ . Это примерно на порядок меньше пластических деформаций удлинения, возникающих в результате сварочного нагрева при охлаждении ($\alpha T^* \approx 1\%$). Запас же пластичности при линейном напряженном состоянии у низколегированных сталей не менее 20%. Следовательно, как процесс сварки, так и последующее нагружение внешней нагрузкой приводят к незначительному уменьшению пластичности металла в районе сварного соединения. Поэтому остаточные сварочные напряжения практически не оказывают влияния на прочность сварных соединений при статическом нагружении, если металл сохраняет способность к пластическому деформированию.

Однако, как указывалось в подразд. 20.3, способность к пластическому деформированию металла снижается при работе в условиях низких температур и объемного напряженного состояния, вызываемого концентраторами напряжений. В этих условиях возникает опасность хрупкого разрушения, и роль сварочных напряжений может быть весьма значительной.

Следует подчеркнуть роль остаточных сварочных напряжений в конструкциях, не подвергаемых значительным статическим нагружениям в процессе эксплуатации:

- сжимающие остаточные напряжения понижают местную устойчивость тонкостенных элементов сварных конструкций. При суммировании даже малых рабочих и остаточных напряжений потеря устойчивости может возникнуть при нагрузках меньше расчетных, а в некоторых случаях – даже от остаточных напряжений;
- процессы коррозии усиливаются под влиянием остаточных растягивающих напряжений, а для сталей повышенной прочности и некоторых легированных сталей могут быть причиной появления коррозионных трещин;
- остаточные растягивающие напряжения являются необходимым условием появления так называемых холодных трещин в сталях, склонных к закалке. Они возникают непосредственно после сварки или в процессе вылеживания сварных конструкций;
- остаточные сварочные напряжения являются носителями энергии упругой деформации. Так как напряжения максимальны в

зоне сварных соединений, то значительная часть энергии сосредоточена там. Начавшееся по каким-либо причинам разрушение в дальнейшем поддерживается энергией остаточных напряжений. Трещина может распространяться на значительную длину, сделав невозможным последующий ремонт сварной конструкции. Энергия остаточных напряжений усиливает динамику процесса разрушения, увеличивает скорость движения трещин и способствует переходу от вязкого разрушения к хрупкому.

Влияние сварочных напряжений на прочность сварных соединений при переменном нагружении

Положительное влияние сжимающих напряжений на работоспособность сварных соединений и конструкций при переменном нагружении подтверждается опытом эксплуатации реальных конструкций: сжимающие напряжения повышают, а растягивающие напряжения понижают усталостную прочность.

Особенно существенно влияние остаточных сварочных растягивающих напряжений при наличии концентраторов, именно в их районе в первую очередь возникают разрушения от усталости.

Степень отрицательного влияния растягивающих напряжений зависит от уровня эксплуатационных напряжений и коэффициента концентрации напряжений. Чем выше рабочие напряжения и чем больше концентрация напряжений, тем меньше доля влияния растягивающих напряжений, и наоборот, при невысоких рабочих напряжениях и малых концентрациях напряжений относительное отрицательное влияние растягивающих остаточных напряжений проявляется сильнее. Объясняется это тем, что остаточные сварочные напряжения являются собственными, т. е. взаимно уравновешенными, и если при первых же циклах нагружения в перегруженных зонах произошла пластическая деформация, в результате которой остаточные напряжения понизились, то собственные напряжения самопроизвольно не восстанавливаются. Поэтому при высоких рабочих напряжениях и высокой концентрации напряжений на первых же циклах нагружения возникают пластические деформации от суммы рабочих и остаточных напряжений. Кроме того, значительная концентрация напряжений по своему влиянию превалирует над собственными напряжениями. При небольшой концентрации напряжений остаточные растягивающие напряжения сохраняют свой высокий уровень в процессе эксплуатации и увеличивают средние напряжения цикла, тем самым понижая выносливость.

Сказанное выше подтверждает, что наиболее эффективным способом повышения усталостной прочности является создание в зоне концентрации напряжений сжимающих остаточных напряжений (путем поверхностного наклепа, местного нагрева, обжата смежных с концентратором зон металла и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Раздел 1

- Петров Г. Л., Тумаров А. С.* Теория сварочных процессов. М.: Высш. шк., 1977. 391 с.
Славянов А. Г. Электрическая отливка металлов. Л.: Машгиз, 1954.

Раздел 2

- Акулов А. И., Бельчук Г. А., Демьянцевич В. Г.* Технология и оборудование сварки плавлением. М.: Машиностроение, 1977. 431 с.
Бельчук Г. А., Гатовский К. М., Кох Б. А. Сварка судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1980. 446 с.
Гуляев А. И. Технология точечной и рельефной сварки. М.: Машиностроение, 1978. 298 с.
Григорьянц А. Г., Шиганов Н. Ю. Лазерная сварка металлов. М.: Высш. шк., 1988. 128 с.

Раздел 3

- Патон Б. Е., Лебедев В. И.* Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. Киев: Машиностроение, 1966. 358 с.
Рабинович Н. Я. Оборудование для электрической сварки. М.: Машиностроение, 1988.
Фролов В. В. Физико-химические процессы в сварочной дуге. М.: Машиностроение, 1954.

Раздел 4

- Сварка в машиностроении: Справочник. М.: Машиностроение, 1978. 50 с.
Теория сварочных процессов/ Под ред. В. В. Фролова. М.: Высш. шк., 1988. 588 с.

Раздел 5

- Закс И. А.* Электроды для дуговой сварки сталей и никелевых сплавов: Справ. пособие. СПб.: "Welcom", 1996.
Петров Г. Л. Сварочные материалы. Л.: Машиностроение, 1972. 279 с.

Раздел 6

- Горбач В. Д., Головченко В. С.* Автоматическая дуговая сварка с ЧПУ судовых конструкций. СПб.: Судостроение, 2001.

Горбач В. Д., Суздаев И. В., Кисилевский Ф. И. Повышение качества и надежности сварных конструкций путем адаптивного управления процессами сварки// Судостроение. 2002. № 1. С. 46–48.

Головченко В. С., Доброленский С. П., Мисюров И. П. Тепловая резка в судостроении. Л.: Судостроение, 1975. 276 с.

Раздел 7

Новожилов Н. М. Основы металлургии дуговой сварки в газах. М.: Машиностроение, 1979. 230 с.

Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. М.: Машиностроение, 1976. 767 с.

Раздел 8

Сварка и свариваемость материалов: Справочник/ Под ред. В. Н. Волченко. М.: Металлургия, 1994. Т. 1. 1526 с.

Раздел 9

Гуревич С. М. Справочник по сварке цветных металлов. Киев: Наукова думка, 1981. 607 с.

Руссо В. Л. Дуговая сварка в инертных газах. Л.: Судостроение, 1984. 118 с.

Раздел 10

Электрошлаковая сварка и наплавка/ Под ред. Б. Е. Патона. М.: Машиностроение, 1980. 511 с.

Раздел 11

Старенбочек Ю. А., Хоруков В. Ф., Грецкий Ю. Я. Сварка и наплавка чугуна. Киев: Наукова думка, 1966. 216 с.

Раздел 12

Контроль качества сварки/ Под ред. В. Н. Волченко. М.: Машиностроение, 1976. 327 с.

Раздел 13

Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз, 1957.

Разделы 14 – 19

Виноградов В. А. Сварочные деформации и напряжения. М.: Машиностроение, 1961.

Гатовский К. М., Кархин В. А. Теория сварочных деформаций и напряжений. Л.: Судостроение, 1980.

Кузьминов С. А. Сварочные деформации судовых конструкций. Л.: Судпромгиз, 1979.

Окерблом Н. О. Расчет деформаций металлоконструкций при сварке. М.-Л.: Машгиз, 1955.

Раздел 20

Николаев Г. А., Винокуров В. А. Сварные конструкции: расчет и проектирование. М.: Высш. шк., 1990.

Улич Г. Г., Ревя П. У. Коррозия и борьба с ней. Л.: Химия, 1989.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СВАРОЧНЫХ РАБОТ

Все рассмотренные способы сварки при своем использовании требуют соблюдения комплекса правил техники безопасности и охраны труда, которые должны отражаться в соответствующей технической документации и строго соблюдаться при проведении сварочных работ.

Для сварки плавлением опасные воздействия на сварщика (сборщика) оказывают следующие факторы.

1. *Поражение электрическим током* при прикосновении к токоведущим частям электрической цепи. При сварке плавлением используются источники тока с напряжением холостого хода $U_{xx} = 45...80$ В при постоянном токе, $U_{xx} = 55...75$ В при переменном токе, $U_{xx} = 180...200$ В при плазменной резке.

Электрическое поражение человека возникает при прохождении через организм тока силой более 0,05 А. Сопротивление человеческого тела переменное. При сухой коже оно находится в пределах 8000...20 000 Ом; при влажной коже или одежде (что нередко бывает в производственных условиях) оно снижается до значений 400...1000 Ом, и в соответствии с законом Ома опасное напряжение составляет 20...100 В. Опасность поражения усиливается при работе в закрытых металлических помещениях судна в положении лежа, при мокрой одежде и т. д. Для предупреждения поражения электрическим током необходимы:

- а) обеспечение надежной изоляции всех токоведущих частей (особенно кабелей), заземление корпуса сварочных аппаратов, надежное устройство электродержателя для ручной сварки (его хорошая изоляция), наличие устройств, автоматически отключающих высокое напряжение в момент холостого хода, и др.;
 - б) работа в сухой спецодежде и рукавицах. При работе в замкнутых пространствах (отсеках судна) обязательно использование резиновой обуви, ковриков и источников освещения с напряжением 6...12 В.
2. *Опасность поражения лучами электрической дуги.* Сварочная дуга представляет собой источник световых лучей, яркость которых может вызвать серьезный ожог глаз при облучении всего за 10...15 с. Более длительное облучение приводит к повреждению хрусталика и потере зрения. Ультрафиолетовая часть

облучения вызывает ожоги глаз и кожи, оно подобно интенсивному солнечному освещению.

Реальной опасностью является облучение рентгеновскими лучами при работе на электронно-лучевых установках с ускоряющим напряжением более 20 кВ и лучом лазера (даже отраженные лазерные лучи могут вызывать тяжелые ожоги и необратимое поражение глаз).

Для предотвращения поражения глаз при дуговой сварке открытой дугой необходимо применение специальных защитных стекол в сварочных щитках и шлемах, применение защитных переносных щитков и штор, работа в специальных кабинах.

3. *Отравление вредными газами и аэрозолями, выделяющимися при сварке.* Для обеспечения этих норм в сварочном производстве предусмотрен целый ряд мер. К ним относятся установка общеобменной вентиляции в цехе по принятым нормам, наличие на стационарных рабочих местах местных отсосов, применение индивидуальных средств защиты при работе в закрытых помещениях. Последние в настоящее время находят все большее применение (подача свежего воздуха под маску-шлем и т. д.). Специально сконструированные с применением современных материалов индивидуальные средства защиты могут надежно оградить сварщика от вредных паров и аэрозолей.

При большом объеме сварочных работ в закрытых помещениях (отсеках) и применении в качестве защитных газов углекислоты (или аргона), учитывая, что эти газы тяжелее воздуха и могут скапливаться на полу помещения, постепенно поднимаясь, вытеснять воздух из помещения, шланг местного отсоса следует располагать обязательно в нижней точке помещения, в котором производятся сварочные работы.

4. *Брызги расплавленного металла и шлака* при сварке имеют температуру до 1800 °С, и для защиты от них сварщик должен иметь спецодежду (брюки, куртку, рукавицы из брезента или специальной ткани). Брызги могут также вызывать пожары, если сварка производится около горючих легковоспламеняющихся материалов (что недопустимо).
5. *Опасность взрыва* возникает при небрежной транспортировке, использовании и хранении баллонов с сжатыми газами (кислородом, азотом, аргоном, гелием), а также при проведении сварочных работ в емкостях без предварительного тщательного контроля за их очисткой от бывших там горючих материалов.

При использовании баллонов со сжатыми газами недопустимо хранить вместе с кислородом баллоны с горючими газами, устанавливая их вблизи нагревательных приборов; следует хранить баллоны в верти-

кальном положении, избегать резких толчков при транспортировке. При замерзании влаги в редукторах баллонов с CO_2 отогревать газ только с применением специального электроподогревателя; категорически запрещается отогревать любые баллоны со сжатыми газами открытым пламенем, что чревато неизбежным взрывом баллона.

Емкости, ранее заполненные горючими веществами, должны быть тщательно очищены от их остатков (трехкратная промывка 10%-ным раствором щелочей) с последующей продувкой сжатым воздухом.

На проведение любых сварочных ремонтных работ требуется специальное разрешение пожарной охраны.

Следует тщательно изучить и неукоснительно соблюдать соответствующие инструкции по технике безопасности, имеющиеся на каждом предприятии.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Сварка, ее физическая сущность и значение для судостроения	5
1.1. Краткая историческая справка о развитии сварочной техники в судостроении	5
1.2. Механизм образования сварочного соединения	9
1.3. Система классификации сварочных процессов	12
2. Основные характеристики сварки давлением и плавлением	15
2.1. Разновидности способов сварки давлением	15
2.2. Способы сварки плавлением	26
2.3. Пайка металлов	53
3. Источники питания сварочной дуги.	
Сварочное оборудование	63
3.1. Физические основы сварочной дуги	63
3.2. Требования к источникам питания сварочной дуги.	
Их общая характеристика	70
3.3. Источники переменного тока	72
3.4. Источники постоянного тока	75
3.5. Принципы построения сварочных головок для механизированных способов сварки	81
3.6. Оборудование для дуговой сварки сталей механизированными способами	86
4. Структура сварного соединения	94
4.1. Зона термического влияния	95
4.2. Металл шва, особенности его кристаллизации и свойств	98
4.3. Понятие «свариваемости» металлов	109
4.4. Горячие трещины при сварке	111
4.5. Холодные трещины при сварке	114
5. Основы металлургических процессов при сварке.	
Сварочные материалы	117
5.1. Формирование металла шва и характеристики основных металлургических процессов при сварке плавлением	117
5.2. Сварочные материалы	128


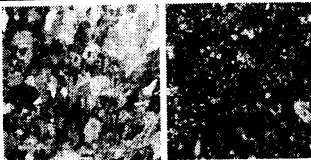
6. Технические требования к точности обработки деталей и сборки конструкций под электросварку	146
6.1. Требования к сварным швам соединений стальных конструкций	146
6.2. Требования к стальному прокату, применяемому для корпуса судна	161
6.3. Характеристика и требования к деталям корпуса судна, идущим на сборку под дуговую сварку конструкций	163
6.4. Основные технологические процессы изготовления деталей корпуса судна	173
6.5. Характеристика судовых конструкций и технические требования к их соединениям под сварку	185
6.6. Влияние точности деталей и точности сборки соединений конструкций под сварку на возможность качественного ее выполнения	191
7. Технология сварки низкоуглеродистых и низколегированных конструкционных судостроительных сталей	200
7.1. Свойства низкоуглеродистых и низколегированных сталей и их свариваемость	200
7.2. Общие вопросы технологии сварки	204
7.3. Особенности технологии ручной сварки	207
7.4. Особенности технологии механизированной сварки под флюсом	214
7.5. Технология сварки в среде защитных газов	219
7.6. Технология сварки другими способами	225
7.7. Основы сборки и сварки корпусных конструкций	227
8. Основные особенности сварки сталей с повышенным содержанием легирующих элементов	233
8.1. Общая характеристика сталей этой группы	233
8.2. Особенности свариваемости сталей повышенной прочности перлитного и мартенситного классов	235
8.3. Выбор сварочных материалов	243
8.4. Особенности технологии сварки различными способами	246
8.5. Свариваемость и технология сварки высоколегированных сталей	251
8.6. Технология сварки разнородных металлов	258
9. Технология сварки цветных металлов и сплавов на их основе	263

9.1. Общие характеристики применяемых в судостроении цветных металлов и сплавов. Особенности их свариваемости	263
9.2. Основы технологии сварки меди и ее сплавов	266
9.3. Основы технологии сварки алюминия и его сплавов	271
9.4. Основы технологии сварки титана и его сплавов	285
9.5. Особенности сварки тугоплавких химически активных металлов	298
10. Особенности выполнения наплавочных работ	301
10.1. Электродуговая наплавка	301
10.2. Электрошлаковая наплавка	309
11. Технология сварки чугуна и ее применение при ремонте	312
11.1. Особенности свариваемости чугуна	312
11.2. Способы сварки чугуна	314
11.3. Технология заварки дефектов литья горячим способом	321
12. Контроль качества сварки	322
12.1. Дефекты сварных швов и соединений	323
12.2. Внешний осмотр и измерения швов сварных конструкций	326
12.3. Методы обнаружения внутренних дефектов	327
12.4. Магнитные и электромагнитные методы контроля	334
12.5. Капиллярные методы контроля	338
12.6. Правила применения сварки в судостроении	340
13. Тепловые процессы при сварке	342
13.1. Сварочная дуга как источник теплоты	342
13.2. Физические основы тепловых процессов при сварке	345
13.3. Основные предпосылки и допущения в инженерной теории распространения теплоты при дуговой сварке	351
13.4. Мгновенные источники теплоты	355
13.5. Подвижные сосредоточенные источники постоянной мощности	360
13.6. Нагрев мощными быстро движущимися источниками	366
13.7. Практическое значение тепловых расчетов при сварке	371
13.8. Влияние ограниченности изделий на процесс распространения теплоты при сварке	381

14. Общие сведения о сварочных напряжениях и деформациях	386
14.1. Теория сварочных деформаций и напряжений и ее значение	386
14.2. Причины, вызывающие появление деформаций и напряжений при электродуговой сварке	387
14.3. Классификация сварочных напряжений и деформаций	389
15. Деформации и напряжения в балках при тепловом нагружении	394
15.1. Изменение свойств металлов при нагреве	394
15.2. Деформации, напряжения и перемещения, возникающие в неравномерно нагретой балке	399
16. Термомеханические процессы при сварке	410
16.1. Основные допущения, принимаемые в инженерных методах определения сварочных деформаций и напряжений	410
16.2. Образование продольных сварочных деформаций и напряжений	412
16.3. Образование поперечных сварочных деформаций	424
16.4. Образование угловых сварочных деформаций	431
17. Расчетное определение сварочных деформаций и напряжений в балочных конструкциях	437
17.1. Определение общих сварочных деформаций от ряда продольных швов	437
17.2. Приближенное построение эпюр остаточных деформаций и напряжений от продольного шва	440
17.3. Определение общих сварочных деформаций от ряда поперечных швов	442
17.4. Методика определения общих сварочных деформаций в балочных конструкциях	445
17.5. Примеры расчета общих сварочных деформаций балочных конструкций	446
17.6. Рекомендации по расчету общих сварочных деформаций судовых конструкций	460
17.7. Пример расчета общих сварочных деформаций бортовой секции	464
18. Местные сварочные деформации	474
18.1. Разновидности местных деформаций	474
18.2. Деформации элементов из плоскости, вызываемые угловыми деформациями сварных соединений	475

18.3. Деформации элементов из плоскости вследствие потери устойчивости	476
19. Методы уменьшения сварочных деформаций и напряжений	480
19.1. Общие положения	480
19.2. Конструктивно-технологические методы уменьшения сварочных деформаций	481
19.3. Технологические методы предупреждения сварочных деформаций	484
19.4. Технологические методы устранения сварочных деформаций и напряжений	490
20. Прочность и коррозионная стойкость сварных соединений	494
20.1. Общие замечания	494
20.2. Прочность сварных соединений при действии статических нагрузок	495
20.3. Хрупкое разрушение сварных соединений	508
20.4. Прочность сварных соединений при действии переменных (циклических) нагрузок	513
20.5. Коррозионная стойкость сварных соединений и конструкций	523
20.6. Влияние сварочных напряжений на прочность и работоспособность сварных соединений и конструкций	532
Список литературы	541
Приложение	544

Опечатки и исправления

№ стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
1	1 сверху	С.А.Андреев	С.Б.Андреев
108	Рис.4.8		
115	формула	$C_{\text{эк}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Ni}}{10} + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Cu}}{5} + \frac{\text{Mo}}{4} + \frac{\text{V}}{14}$	$C_{\text{эк}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Ni}}{10} + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Cu}}{5} + \frac{\text{Mo}}{4} + \frac{\text{V}}{14}$
214	Рис.7.3	τ_B	σ_B
348	10 снизу	(13.3)	(13.11)
350	4 сверху	По расчётной	При расчётной
350	8 снизу	(13.9)	(13.19)
356	3 снизу	XOZ	XOY
356	1 снизу	$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right _{XOZ}$	$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right _{XOY}$
360	6 снизу	находиться	находится
379	3 сверху (в ф-ле)	$(T - T_0)$	$(T - T_0)^2$
382	Рис.13.14	$4s, 2s$	$4s, 2s$
384	Рис.13.15	см. на обороте	см. на обороте
384	(4...6) снизу	На рис.13.16 иллюстративно показан учёт ограниченности изделий по ширине на процесс распространения теплоты (сварка узких полос различной ширины)	Не читать
388	6 строка	$12 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$
394	4 снизу	$10^4 \dots 10^5 \text{ 1/}^\circ\text{C}$	$10^{-4} \dots 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$
502	формула 20.9	$[\sigma]_p$	$[\sigma']_p$
504	3 сверху	момент сечения балки	момент инерции сечения балки
505	14 сверху	$12,5 \cdot 10^6$	$12,5 \cdot 10^{-6}$
541	3 сверху	Тумаров А.С.	Темарев А.С.
542	10 снизу	Старенбочек Ю.А.	Старенбоген Ю.Я.
542	4 снизу	1957	1951
542	2 снизу	Виноградов В.А.	Винокуров В.А.
542	1 снизу	1961	1968
543	2 сверху	Л.: Судостроение, 1980	Л., 1980
543	3 сверху	Сварочные деформации судовых конструкций. Л.: Судпромгиз, 1979	Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. Л.: Судостроение, 1974.
543	1 снизу	Улич Г.Г.	Улиг Г.Г.

Учебное издание

Андреев Сергей Борисович
Головченко Василий Семенович
Горбач Владимир Дмитриевич
Руссо Владимир Леонидович

Основы сварки судовых конструкций

Редактор *А. Г. Ларионова*
Верстка и дизайн *М. Е. Азарова*
Переплет *Л. Ю. Шундаловой*

Подписано в печать 25.01.2006. Формат 60x90^{1/16}.
Гарнитура Petersburg. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 36.
Уч.-пзд. л. 33. Тираж 1000 экз. Заказ № 1398.

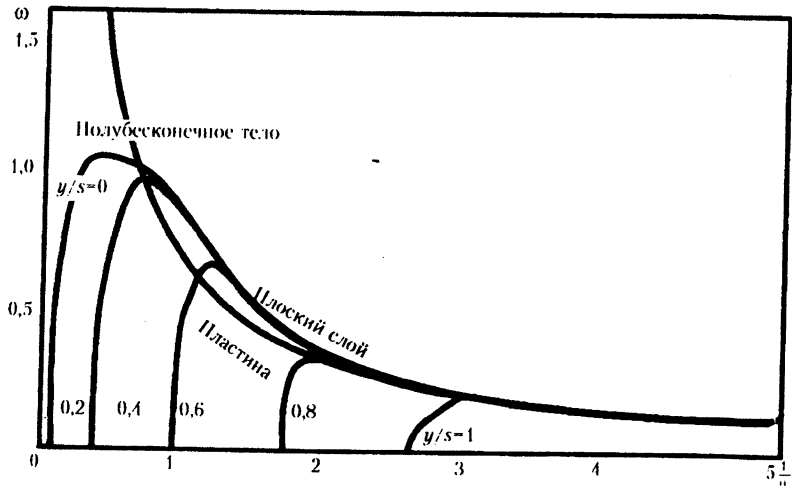
Издательство «Судостроение»
191186, С.-Петербург, ул. Малая Морская, 8

Отпечатано с готовых диапозитивов в ОАО «Издательско-полиграфическое предприятие «Искусство России»
198099, Санкт-Петербург, ул. Промышленная, д. 38, корп. 2.

Опечатки и исправления

Стр. 384, рис. 13.15

Напечатано



Должно быть

