



ТЕХНОЛОГИИ

Сварка Введение в специальность

Учебное пособие

СОВРЕМЕННЫЕ



СВАРКА. ВВЕДЕНИЕ В СПЕЦИАЛЬНОСТЬ

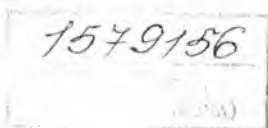


Серия
«Современные
технологии»
основана в 2012 г.

Сварка Введение в специальность

Под редакцией проф. В.А. Фролова

Допущено Учебным объединением высших
учебных заведений РФ по образованию
в области материаловедения, технологии
материалов и покрытий в качестве
учебного пособия для студентов высших
учебных заведений, обучающихся
по направлению подготовки бакалавров
150100 «Материаловедение и технологии
материалов»



МОСКВА ◦ АЛЬФА-М ◦ ИНФРА-М ◦ 2015

УДК 621.791(075.8)

ББК 34.641

С24

ФЗ
№ 436-ФЗ

Издание не подлежит маркировке
в соответствии с п. 1 ч. 4 ст. 11

Рецензенты:

доктор технических наук *С.В. Лебедев*,
кандидат технических наук *В.А. Хаванов*

С24

Сварка. Введение в специальность : учебное пособие /
В.А. Фролов, В.В. Пешков, А.Б. Коломенский, В.А. Каза-
ков ; под ред. проф. В.А. Фролова. — 4-е изд., перераб. —
М. : Альфа-М : ИНФРА-М, 2015. — 384 с. : ил. — (Совре-
менные технологии)

ISBN 978-5-98281-324-4 («Альфа-М»)

ISBN 978-5-16-006255-6 («ИНФРА-М»)

Приведена краткая история зарождения и развития сварки; рассмотрены основные виды сварки и процессы, протекающие при сварке; даны примеры применения сварки для решения конкретных задач.

Для студентов первого курса, обучающихся по специальностям 150100 «Материаловедение и технологии материалов» и 150415 «Сварочное производство», дисциплина «Введение в специальность». Может быть полезно студентам лицеев и колледжей сварочных специальностей.

УДК 621.791(075.8)

ББК 34.641



Соответствует
федеральному государственному
образовательному стандарту
3-го поколения

ISBN 978-5-98281-324-4 («Альфа-М»)

ISBN 978-5-16-006255-6 («ИНФРА-М»)

© Фролов В.А., Пешков В.В.,
Коломенский А.Б., Казаков В.А., 2013
© «Альфа-М» : «ИНФРА-М», 2015

ВВЕДЕНИЕ

Сварка принадлежит к числу великих русских изобретений. Она преобразила многие технологические процессы производства машин и механизмов, строительства судов и сооружений, оказывает большую помощь в освоении космоса.

В настоящее время сварка является крупным самостоятельным видом производства и применяется для создания и возведения принципиально новых конструкций и сооружений, для ремонта машин и аппаратов, получения изделий со специальными свойствами. Сварные конструкции работают при сверхвысоких и сверхнизких температурах, при давлениях, значительно превосходящих атмосферное, и в условиях космического вакуума. Современные достижения в области сварки позволяют соединять не только металлы, но и пластмассы, стекло, керамику и другие материалы. При этом свариваемые элементы могут иметь размеры от нескольких микрон в производстве изделий электронной техники до десятков метров в машиностроении и строительстве (рис. В1—В9). В последнее время сварку применяют для соединения мягких живых тканей (рис. В10). Сварку используют и для создания скульптур в монументальном искусстве (рис. В11). Сварку выполняют на воздухе, под водой, в вакууме (рис. В12). Летчики-космонавты Г. Шонин и В. Кубасов на борту космического корабля «Союз-6» впервые в мире осуществили сварку в условиях космического вакуума и невесомости. Космонавтами В. Джанибековым и С. Савицкой во время полета станции «Союз-7» в открытом космосе в течение 3 ч производились сварка, резка и пайка металлов, что доказало возможность выполнения различных ремонтных работ космических аппаратов.

К области сварочных технологий относят также резку металлов, наплавку одного металла на другой, напыление и металлизацию. Пайку, которая по своей природе отличается от сварки, также традиционно относят к сварочным технологиям.

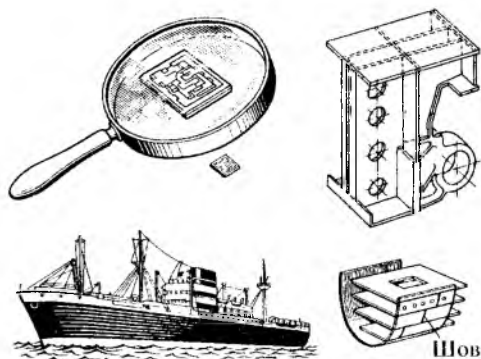


Рис. В1. Примеры сварных конструкций в технике

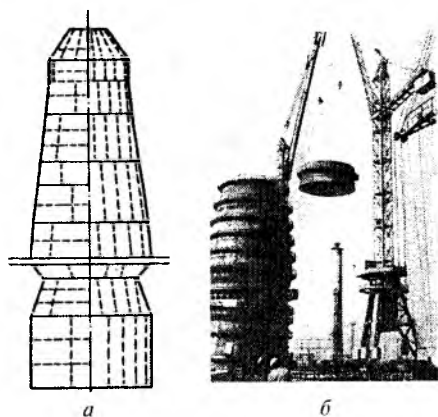


Рис. В2. Сварная конструкция кожуха доменной печи:
а — схема раскроя листов кожуха; б — подъем элемента кожуха для сварки кольцевого шва

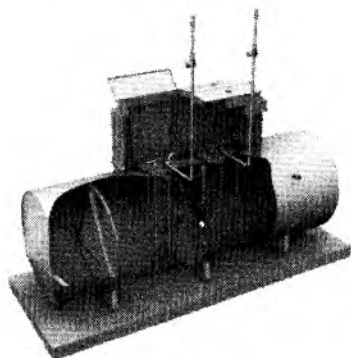


Рис. В3. Сварной резервуар для хранения нефтепродуктов



Рис. В4. Уникальное сооружение — цельносварной автодорожный мост им. Е.О. Патона через Днепр в Киеве. Длина моста 1542 м, общая масса 10 тыс. т, 20 пролетов по 58 м и 4 судоходных пролета по 87 м

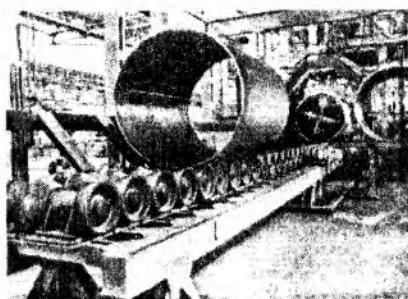


Рис. В5. Сборка и сварка многослойных труб диаметром 1420 мм



Рис. В6. Стыковая сварка рельс

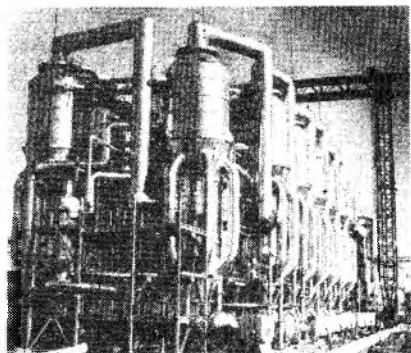


Рис. В7. Сварные конструкции Шевченковского атомного реактора на быстрых нейтронах

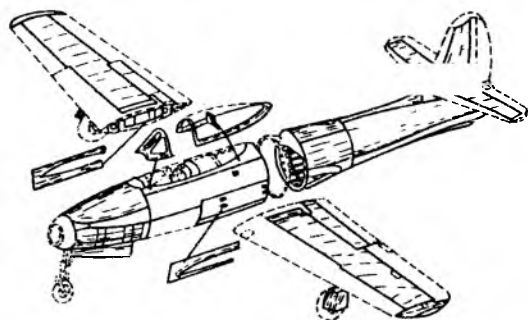


Рис. В8. Схема расположения сварных соединений самолета «Фиат» — одного из первых в истории авиации с широким применением сварки в ответственных узлах

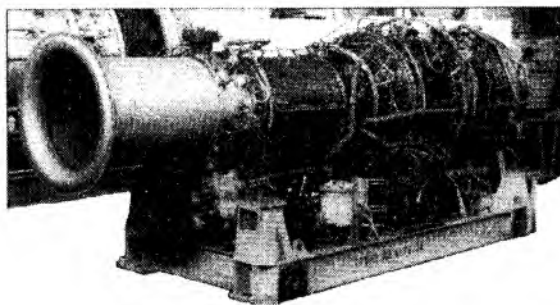
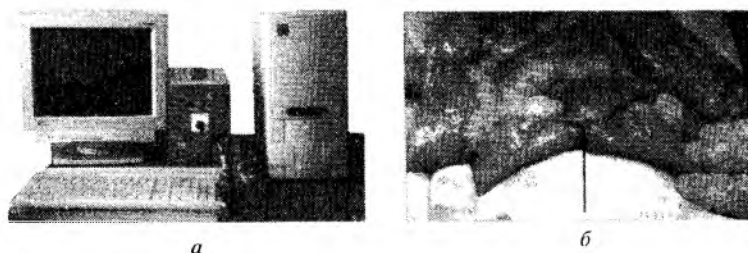


Рис. В9. Газовая турбина Д071 для корабельного двигателя



Р и с. В10. Сварочный комплекс для соединения мягких живых тканей (*а*) и сварной шов (*б*) на разрезе желчного пузыря (указан стрелкой)



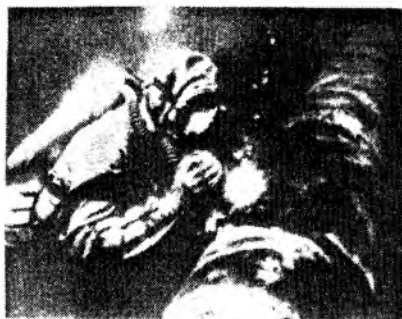
Р и с. В11. Скульптуры из коррозионно-стойкой стали, выполненные с помощью литья и сварки:

а, б — «Рабочий и колхозница»; *а* — общий вид; *б* — фрагмент, автор — В.И. Мухина (Москва); *в* — «Падающий человек», автор — Э. Трова (Сент-Луис, штат Миссури, США)

Круг проблем, охватываемых ныне сваркой, требует обширных знаний в таких областях, как металлофизика, физическая химия, физика высоких энергий, квантовая механика, вычислительная техника и др. Можно утверждать, что сварка, как важный научно-технологический процесс, является существенным звеном технического прогресса. Если отмирание некоторых производств происходит незаметно, безболезненно или с малыми, относительно несущественными последствиями, то гипотетическое удаление сварки из суммы технологий однозначно приведет к полной остановке технических и смежных с ними отраслей промышленности.



а



б

Рис. В12. Сварка в космосе (а) и под водой (б)

Создание и продвижение в жизнь все новых и новых материалов с широким спектром характеристик неразрывно связаны с усложнением и постоянным развитием служебных свойств машин и механизмов; и здесь без сварки не обойтись. Молодость сварки, ее широта и универсальность, высокая экономическая эффективность служат залогом дальнейшего развития сварочной науки и техники. Сварке металлов и неметаллов, несомненно, принадлежит будущее. Глубоко символичен девиз широко известной немецкой фирмы BINZEL, выпускающей сварочное оборудование: «Мир вращается вокруг сварки».

Каждому интересно узнать о будущем своей профессии. Историки говорят: лучший ключ к тайнам будущего — в знании прошлого. Поэтому представления о перспективах сварки должны опираться на ее историю.

ГЛАВА 1 ИЗ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ СВАРКИ

1.1. Сварка в древности

Многие достижения человечества, в том числе в области сварочной технологии, берут начало из недр каменного века.

Еще в глубокой древности из самородков золота, серебра, меди при помощи каменного орудия обковывали пластинки, острые лезвия, скребки и т.п., которые для увеличения их размеров соединяли между собой. Удары по сложенным вместе кускам металла позволяли их соединить. Это был один из видов сварки — сварка в холодном состоянии путем приложения деформирующих усилий. Способ холодной сварки совершенствуется до сих пор и эффективно применяется в наше время.

За несколько тысячелетий до нашей эры некоторые племена научились добывать из руды медь. Чтобы из меди изготовить крупное изделие, они прибегали к сварке отдельных подогретых кусков металла. Подогрев металла до пластического состояния облегчал схватывание, а процесс соединения напоминал ковку. Поэтому его называют кузнечной сваркой.

Появление нового материала — бронзы — заставило древних умельцев разрабатывать новые методы сварки. Так как бронза имеет более высокую прочность, твердость, сопротивление истиранию, чем медь, но ее пластичность значительно ниже, чем у меди, сварка бронзы методом пластической деформации, даже с подогревом, не обеспечивала образования соединения. Вероятно, древние мастера не раз наблюдали, как перегретые капли расплавленной бронзы, попадая на бронзовые пластины, иногда прочно «схватывались» с ними. Свойством схватываться, привариваться воспользовался неизвестный изобретатель литейной сварки, сущность которой в том, что зазор между соединяемыми заготовками заполнялся расплав-

ленным металлом и деформирование сварного соединения происходило в твердоджидком состоянии. Вероятно, этим способом в Древней Греции были изготовлены бронзовые сосуды высотой 310 мм со стенками толщиной всего 0,5–0,7 мм.

В III–II тысячелетиях до н.э. в различных районах земного шара начали получать железо. При этом в некоторых случаях масса изделий намного превышала то количество металла, которое можно было получить за одну плавку по существовавшей тогда технологии. Наиболее ярким примером является знаменитый памятник в Индии — колонна (рис. 1.1) из весьма чистого железа (99,97 % Fe). Колонна весит около 6,5 т, имеет высоту 7,3 м при диаметрах у основания 416 мм, а у верха 295 мм. Ее изготовление относится к 415 г. н.э., а вплоть до начала XIX в. не было известно способов получения температур, достаточных для расплавления железа и литья изделий из него. Горение обыкновенной древесины создает температуру 1000–1100 °С, достаточную для плавления меди и ее сплавов. Но чтобы выплавить чистое железо, нужна температура около 1550 °С. Неизвестны и печи, и методы создания такой температуры, причем понадобились тысячелетия, прежде чем появились технические возможности ее достижения.

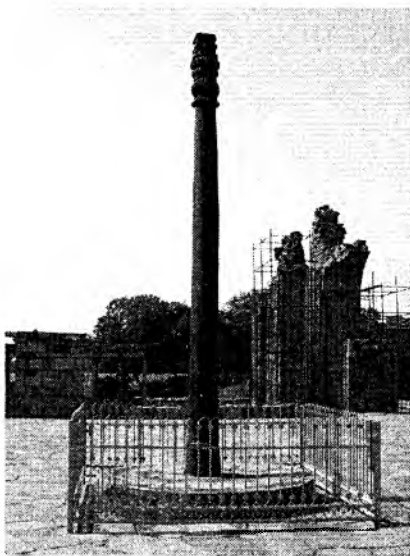


Рис. 1.1. «Столб счастья» в г. Нью-Дели (Индия). По народному поверью, будет счастлив каждый, кто, прислонившись к этому столбу, охватит его руками

Одна из гипотез, объясняющая создание этой колонны, связана с применением кричного метода получения железа с последующей ковкой заготовок (кузнечной сваркой криц) в нагретом состоянии. Сначала в горнах при температурах примерно 1000 °С восстановлением железной руды древесным углем получали крицу, имеющую вид губчатой массы и состоящую из зерен чистого железа и шлака. Затем крицу неоднократно проковывали в нагретом состоянии. При этом отдельные частицы железа соединялись — сваривались, образуя плотный металл — сварочное железо. Для того чтобы увеличить массу металла, отдельные заготовки разогревали до белого каления, складывали вместе и проковывали. Без кузнечной сварки железный век начаться не мог.

В изготовлении орудий труда и оружия кузнецы-сварщики достигли высокого мастерства. Множество искусных железных мечей хранится в музеях мира. Так, мечи I—II вв., найденные на местах древнеримских крепостей и поднятые с затонувших кораблей, имеют клинки, неоднородные по толщине и представляющие собой чередующиеся в определенной последовательности слои твердой стали и мягкого железа. Мечи обладали высокой прочностью и к тому же были самозатачивающимися. Современными методами металлографии установлено, что один из клинков имел 11 слоев. Такая работа требовала овладения всеми тонкостями кузнечной сварки, огромного опыта, интуиции (о науке говорить было еще рано). Многослойные тонкие клинки с дифференцированными свойствами можно считать вершиной кузнечной сварки.

В античные времена высокого экономического и общественного развития достигла Эллада. Кузнечное ремесло было в таком почете, что, согласно греческой мифологии, им не гнушался заниматься один из олимпийских богов — Гефест, покровитель искусств и ремесел.

Значительного успеха искусство металлообработки достигло в Киевской Руси в IX—XII вв. Уровень производства и обработки был достаточно высоким: изготавливались прекрасные ювелирные украшения (рис. 1.2), вооружение и орудия труда, отличавшиеся высоким качеством и чистотой сварных швов в

местах соединений. Для изготовления мечей, наконечников копий применяли сталь и железо различных сортов. Часто из прочной стали изготавливали только режущую кромку и наварили на нее кузнечным способом сталь помягче. Кузнецы клеймили свои изделия, наваривая на металл буквы и знаки.

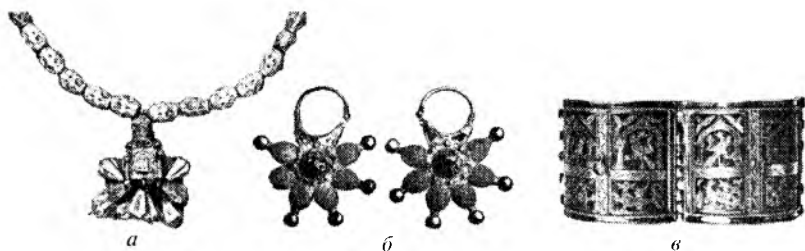


Рис. 1.2. Ювелирные украшения:

а — ожерелье; *б* — кольца; *в* — браслет (XII в., пайка)

Развитие производительных сил, подъем экономики на Руси, освободительная борьба русского народа против монголо-татарского ига подняли на новую ступень кузнечно-сварочное дело. В 1382 г. против орды хана Тохтамыша использовали кованосварные пушки, при изготовлении которых железную крицу расковывали в лист, а затем его скручивали на железной оправке в трубу. Взаимно перекрывавшиеся кромки листа сваривали внахлестку продольным швом. Затем на эту трубу наварили еще один или два листа, следя за тем, чтобы сварные швы не совпадали. Несколько таких многослойных частей заготовок соединяли, предварительно отковывая сопрягаемые концы заготовок в виде внутреннего или наружного конуса, что позволяло их затем соединить внахлестку кузнечной сваркой (рис. 1.3). В романе «Пётр Первый» выдающимся писателем и знатоком русской истории А.Н. Толстым достаточно точно и ярко описан процесс приварки лапы к якорю массой 600 кг.

Для того чтобы изготовить крупное изделие (вал, длинную полосу), требовалась крупная заготовка. Такие заготовки получали из пакета мелких листов. Пакет, скрепленный оболочкой, нагревали в печи и проковывали-сваривали, придавая форму

бруса. При необходимости несколько таких брусков сваривали между собой.

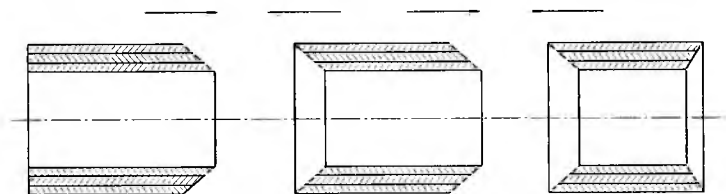


Рис. 1.3. Схема элементов ствола пушки, получаемого кузнечной сваркой

В XIX в. в России расширялось применение электрического привода на промышленных предприятиях, наблюдался подъем транспортного строительства, промышленность овладела передовой технологией производства паровозов, вагонов, пароходов, резко увеличился выпуск паровых котлов и паровых машин и т.п. В этот период кузнечная сварка достигла своей вершины: кувалде молотобойца пришел на смену молот, крупные детали обжимали гидравлическими прессами, улучшились конструкции печей для нагрева свариваемых заготовок. Однако во многих отраслях такая сварка сдерживала производство. Она была трудоемка, малопроизводительна, требовала громоздких печей и молотов, при этом качество сварных швов было нестабильным и не удовлетворяло требованиям развивающейся техники: при большом числе свариваемых заготовок имели место дефекты — непровары, приводившие к расслоению металла и разрушению нагруженных деталей во время работы. Это было обусловлено тем, что основными технологическими параметрами процесса сварки являлись температура свариваемого металла и его деформация в зоне сварки (обусловленная ударами молота), которые трудно было выдерживать в требуемом достаточно узком диапазоне.

Широко применяемая в настоящее время сварка плавлением, когда происходит локальное расплавление свариваемых поверхностей, образование общей сварочной ванны с последующей кристаллизацией, требовала мощного источника теплоты, способного локально расплавить металл, а такого источника в то время не было.

1.2. История возникновения и развития пайки

Пайка — процесс, родственный сварке и представляющий собой соединение металлических деталей, находящихся в твердом состоянии, посредством расплавленного припая.

Историки относят пайку как технологию соединения при производстве изделий из металлов к древнейшим. Она возникла одновременно с началом изготовления изделий из искусственных металлических материалов — бронзовых, а затем железных и стальных орудий труда, оружия и предметов быта. Важнейшими предпосылками появления пайки были овладение техникой нагрева, создание печей, горнов и других устройств для сжигания органического топлива с естественным или искусственным дутьем. На протяжении тысячелетий и вплоть до настоящего времени прогресс в области техники и технологии пайки во многом определяется способом подачи теплоты в зону соединения.

Как считает большинство археологов, первыми припоями были олово и бронза из-за сравнительно низкой температуры плавления, что позволяло расплавлять их на открытом огне костра с помощью известных тогда способов дутья. Действительно, археологические данные подтверждают, что пайка появилась на рубеже медного и бронзового веков, т.е. в III—II тысячелетиях до н.э. В этот период технология выплавки бронзы развивалась в местностях, где наряду с месторождениями самородной меди разрабатывались залежи оловосодержащих минералов. Часто бронзы получались при смешивании различных руд, причем в рудах кроме соединений меди или олова обычно содержались и другие сопутствующие металлы. Древнейшими металлургами было замечено, что в зависимости от вида руды изменяются литейные качества сплава: лучшие отливки получались из мышьяковистых и мышьяковисто-сурьмянистых бронз.

К древнейшим очагам выплавки бронзы относят Шумер, Вавилон, регионы Китая и Таиланда. Египет и Греция, где не было месторождений оловянных руд, были вынуждены завозить эти руды или сам металл и бронзу из Центральной Африки

и Шумера (Египет), стран Среднего Востока (Греция). Финикийцы добрались до Британских островов, где открыли месторождения оловянной руды — касситерита. Таким образом, поиск компонентов бронзы являлся причиной захвата территорий, стимулом путешествий, торговли. Спрос на бронзовые украшения, оружие, предметы быта стимулировал развитие горного дела, металлургии, различных технологий обработки металлов.

Бронза оставалась основным металлом для производства оружия и орудий труда до начала освоения железоделательного производства.

Исследования изделий IV—III тысячелетий до н.э., найденных на территории стран Ближнего Востока (современные Иран, Сирия, Ирак, Турция), свидетельствуют о высоком уровне металлообработки. Большинство изделий из меди и бронзы отлиты в глиняные вертикальные формы (лезвия, шилья и проч.). Для упрочнения иногда применялась последующая проковка, часто с промежуточным отжигом. На рубеже IV—III тысячелетий до н.э. в Шумере существовала узкая специализация в производстве изделий из металла, что способствовало совершенствованию технологий. Так, металлографические исследования украшений свидетельствуют о высоком качестве не только мелких отливок, но и владении техникой филигранны, зернения, чеканки, а также о применении пайки.

При литье, особенно пайке бронзой, состоящей из ряда легирующих элементов, требовалось соблюдать температуру нагрева. На фресках в гробнице египетского фараона Мереруба (2315—2190 до н.э.) представлен процесс пайки (с контролем состава), при котором огонь в плавильном горне раздувает через трубки несколько человек (рис. 1.4). Такая техника нагрева в отличие от костра позволяла оперативно регулировать температуру.

Вполне развитой технологией производства изделий из бронзы уже в VI в. до н.э. владели сарматские племена Поволжья и Южного Приуралья. В частности, для изготовления зеркал они использовали бронзу, состоящую из ряда легирующих элементов — меди, свинца, олова, никеля, соотношение которых обеспечивало хорошие литейные свойства и высокие отражательные способности.

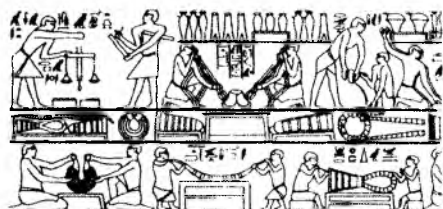


Рис. 1.4. Изображение процесса пайки на фресках в гробнице фараона Мернептах

С самородным золотом человек познакомился еще в эпоху неолита и с того времени начал накапливать опыт, который в последующем пригодился при обработке других металлов. Разнообразные изделия IV—III тысячелетий до н.э., выполненные шумерами и египтянами, свидетельствуют о довольно совершенной технике обработки золота.

Обработка цветных металлов была особенно развита в греческом городе-государстве на северном побережье Черного моря в VII—V вв. до н.э. Пантикапее — крупном ремесленном центре. Античные образцы изделий бытового назначения и искусства, найденные при раскопках, свидетельствуют о том, что греческие тореваты (мастера художественной обработки металлов) владели разнообразной техникой литья, штамповки,ковки, клепки и пайки. Так, в Музее исторических драгоценностей Украины хранится скифский короткий меч-акинак в золотых ножнах, обнаруженный в кургане близ хутора Шумейко Сумской обл. Орнаменты верхней части рукоятки и наконечник ножен выполнены в виде углубленных треугольников, заполненных зернью — мелкими золотыми шариками, припаянными к золотой основе.

В долине реки Супой у села Песчаное Черкасской области были найдены 15 бронзовых греческих ваз VI—IV вв. до н.э. Швы стенок всех ваз кованые, а литые ручки, горельефы и аппликации присоединены пайкой и клепкой, причем некоторые детали позолочены.

В музеях Украины хранятся сотни предметов быта, ювелирных изделий и образцов оружия, украшенные в древнегреческом и скифском стилях с помощью пайки, а также декорированные мельчайшей зернью. Особо отличается золотая пектораль — нагрудное украшение, найденное в 1971 г. в скифском кургане в Днепропетровской области (рис. 1.5). Это уникальное изделие состоит из трех ярусов — между ажурными верхним

и нижним ярусами припаяны литые фигурки людей, реальных и мифических животных.

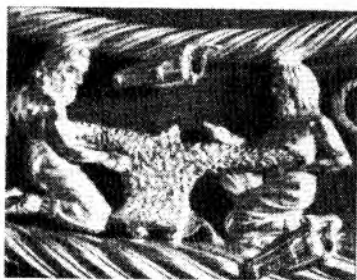


Рис. 1.5. Детали золотой пекторали из мужского погребения (курган Толстая Могила в Днепропетровской обл., Украина)

По внешнему виду паяные соединения не отличаются от цельнолитых деталей из золота или его сплавов. Особенно сложна техника пайки зерни. На поверхности, площадь которой на некоторых изделиях достигает нескольких квадратных сантиметров, размещались припаянные шарики диаметром 0,1–1 мм. При этом разница температур плавления золота и припоев (сплавы золото–медь и золото–серебро) незначительна, поэтому ювелирам приходилось точно выдерживать режим нагрева в пределах одного–двух десятков градусов. Подобную технику пайки золота в 60-х гг. н.э. описал в своих трудах «История природы» (37 книг) римский ученый, писатель и государственный деятель Гай Плиний Старший, который отметил большие трудности при соединении деталей украшений и других сложных изделий.

Монолитные соединения изделий из железа получали в основном кузнечной сваркой и сваркой заливкой. При пайке применяли припои из бронзы и латуни, поскольку разница температур у них достаточно большая, то было менее сложно соблюдать режим нагрева, чем при пайке золота, серебра и бронзы.

Одним из древнейших очагов металлургии железа считается Закавказье. Археологи относят появление железных изделий на территории современных Дагестана, Азербайджана, Армении и Грузии ко II–I тысячелетиям до н.э. В этот период

произошел определенный шаг в развитии металлодобывающих и металлообрабатывающих технологий. В этом регионе значительно ускорился процесс замены бронзового оружия и орудий труда, начавшийся еще в VII в. до н.э.

Техникой изготовления изделий из железа и бронзы отлично владели мастера Киева и Великого Новгорода. При раскопках в слоях X—XIV вв. найдены сотни предметов быта, ювелирные украшения, оружие. Из цветных металлов изготавливали перстни, бубенцы, браслеты, нательные кресты, детали фибулы и ремней.

При пайке оловянных изделий применялась несколько отличная технология. На протяжении многих веков олово являлось одним из основных материалов для изготовления литых пуговиц, посуды, скульптур, деталей приборов и игрушек. Поскольку чистое олово плохо заполняет форму, то для улучшения жидкотекучести к нему добавляют свинец (для посуды не более 3—4 %) и отливку осуществляют в горячие латунные, песочные и другие формы.

Поражают сложностью формы скульптуры, предметы быта, посуда из олова, хранящиеся в Эрмитаже и других музеях мира. Многие из них изготовлены из нескольких спаянных частей (рис. 1.6).

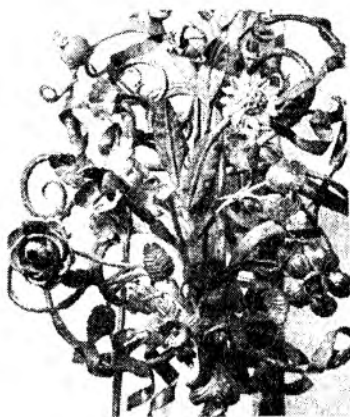


Рис. 1.6. Звонок, украшенный кованым орнаментом из цветов и побегов (Богемия, XVII в.)

В энциклопедическом словаре, изданном в конце XIX в., технология пайки оловянных изделий описывается следующим образом: «спайку производят не более легкоплавким при-

поем, а тем же самым сплавом, из которого изготовлена сама вещь, потому что иначе шов скоро потемнеет и станет виден. Для спайки пользуются обыкновенным медным паяльником и салом вместо паяльной воды, но при работе спаиваемые края тоже плавятся; поэтому, составив части, оловянщик аккуратно подкладывал под спаиваемое место толстый войлок, выдерживающий температуру плавления олова, чтобы расплавленный металл не вытек, а затвердел в прежней форме».

О технике удаления оксидных пленок, точнее, о применении флюсов, можно судить только по редким сохранившимся описаниям. Одним из самых полных средневековых трактатов о технологиях металлов является сочинение монаха Свято-Галленского монастыря Феофила «*Diversarum artium schedula*» (IX–XI вв.). Сохранившийся в библиотеке Кембриджского университета рукописный экземпляр относится к XIII в., он переиздан в Париже в 1843 г. Часть трактата посвящена литью и пайке металлов. Преподобный Феофил рекомендует приготовить флюс в виде пасты (похожей на мыло) из шелока и свежего сала хорошего поросенка, в которую следует добавить соль и металлическую медь. Проверка на современном научном уровне технологии, разработанной в стенах Галленского монастыря, показала, что качество соединений может соответствовать современным требованиям ювелирной промышленности. Паста из сала поросенка и шелока — неплохой флюс, который разлагает при высоких температурах оксидные пленки на поверхности меди. Очищенная медь легко сплавляется с золотом, а образовавшиеся загрязнения уходят в шлак. О применении сала, соды, древесной золы упоминается и в более поздних трактатах.

В трудах Феофила указаны и другие способы и составы приготовления флюсов. Так, для пайки золота необходим «хризолит зеленого оттенка, который предпочтительнее других солей меди. Хризолит смешивают с кипрской медянкой и мочой безбородого мальчика. Добавляют селитру, и все растирают в ступке в порошок. Полученную смесь называют *Santerno* (бура). При пайке золота припоем с примесью одной семнадцатой части серебра такая смесь (флюс) обеспечивает блестящий шов. Золото, которое содержит медь, паять трудно, шов получается тусклым». П. Роберте, анализируя флюс, который при-

меняли золотых дел мастера в Древнем Риме, расшифровывает состав: хризолитгидрат медного силиката $\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, медянка — основной карбонат меди $\text{CuCO}_3 \cdot \text{CuO}$, урина — соли аммония, сода Ca_2CO_3 .

Для пайки серебра Феофил предлагает взять две части чистого серебра и одну (третью) часть меди, перетереть в ступке, затем добавить «винный камень, содрав его от стенок сосудов, где долго хранилось хорошее красное вино». В эту смесь добавить соль (хлористый натрий) и нагревать на огне до тех пор, пока все не испарится, золу снова растереть. Для пайки используют водный раствор этой смеси. При таком соотношении серебра и меди образуется сплав с минимальной точкой плавления $779\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$, а из винного камня и поваренной соли — довольно активный флюс на основе едкого кали. В целом при пайке использовали порошки, содержащие припой и флюс в оптимальном соотношении.

В течение последующих веков пайка оставалась наиболее распространенной технологией получения неразъемных соединений изделий из цветных металлов. Материалы и техника пайки совершенствовались с развитием химии и улучшением источников нагрева. Однако основу флюсов по-прежнему составляли поташ и вещества на основе карбонатов.

Интенсивность нагрева увеличилась за счет дутья с помощью мехов и насосов. Только в XIX в. производительность пайки повысилась благодаря применению высококалорийных горючих газов и электронагрева.

1.3. Рождение и развитие электродуговой сварки

Человек очень давно познакомился с электрическими явлениями в природе — грозой; способностью янтаря, натертого шерстью, притягивать мелкие частицы различных веществ; свойства природных магнитов и т.д.

В России интерес к электричеству постоянно возрастал со времен М.В. Ломоносова. Как только стало известно о создании итальянским физиком А. Вольта нового источника, спо-

собного давать электрическую энергию в результате химических реакций, русские исследователи начали работать с электрическим током. В начале 1802 г. профессор Петербургской медико-химической академии В.В. Петров построил самый крупный для того времени источник тока – батарею из 4200 пар медных и цинковых кружков. Именно эта батарея и стала исторической: на ней была впервые в мире получена электрическая дуга. Ее называли вольтовой, по названию источника тока – вольтова столба. Но современники не сумели по достоинству оценить открытие ученого. От открытия Петрова до технического применения дугового разряда с целью соединения (сварки) и разъединения (резки) металлов прошло около 80 лет. Открытие Петрова значительно опередило свой век. Русский умелец-самородок Н.Н. Бенардос на основании дуги Петрова и достижений мировой электротехники создал принципиально новый способ сварки и резки металлов – электродуговой.

Николай Николаевич Бенардос (26 июля (7 августа) 1842–1905) родился в деревне Бенардосовка на Херсонщине (ныне село Мостовое Николаевской области). С ранних лет он проявлял интерес к различным ремеслам, особенно к технике. По настоянию отца, полковника в отставке, ему пришлось поступить на медицинский факультет Киевского университета, но до конца он там не доучился и перешел в Московскую сельскохозяйственную и лесную академию (ныне Тимирязевская сельскохозяйственная академия).

В 1869 г. Н.Н. Бенардос поселился в маленьком городке Лух Юрьевского уезда Костромской губернии. В имении матери он построил механические мастерские и занялся воплощением своих изобретений, испытаниями и усовершенствованием их. Бенардосу принадлежит более 120 оригинальных изобретений, многие его идеи не потеряли своего значения и сейчас. Диапазон изобретений поразителен – железные бороны и углубители, скороварки и молотильные машины, паровые ножницы и пневматическая поливалка, паровые колеса с поворотными лопастями и охотничьи лодки, замки и краны, турбины для гидроэлектростанций и пушка для метания канатов на терпящий бедствие пароход, летательные аппараты и станки для обработки металла и дерева, пневматические и вагонные тормоза и ветряной двигатель. Большое число изобретений он сделал в области электротехники.

Самым важным изобретением Бенардоса, принесшим ему мировую славу, явился разработанный им в 1882 г. способ электродуговой сварки, названный электрогефестом. Металл

расплавлялся дугой, горящей между угольным электродом, закрепленным в специальном держателе (рис. 1.7), и изделием, подключенным к полюсам источника тока. При этом между генератором и дугой подключалась батарея аккумуляторов. Генератор работал непрерывно, заряжая аккумуляторы, и в момент возбуждения дуги между электродом и металлом в дугу подавалось большое количество энергии. Однако такой источник питания был далек от совершенства. В результате напряженного труда летом 1885 г. Бенардосу удалось полностью, в деталях разработать технологию сварки стали и чугуна и аппаратуру для сварки, успешно провести испытания, и 6 июля 1885 г. он обратился в Департамент торговли и мануфактур России с прошением о выдаче ему привилегии на «Способ прочного скрепления металлических частей и их разъединения непосредственным воздействием электрического тока». На этот процесс Бенардосу были выданы патенты во Франции, Бельгии, Великобритании, Германии, Швеции, позже в Италии, США, Австро-Венгрии, Дании и других странах.



Рис. 1.7. Держатель Н.Н. Бенардоса для ручной дуговой сварки угольным электродом

В 1886 г. в столице России было организовано первое в мире специализированное научно-производственное объединение по электросварке «Электрогефест». Сам Бенардос был здесь одновременно и ученым-исследователем, и конструктором аппаратуры, и рабочим-сварщиком.

С 1886 г. началось практическое применение дуговой сварки в мастерских железных дорог и на других предприятиях.

«Электрогефест» успешно применяли и за рубежом. К середине 1890-х гг. новый технологический процесс был внедрен более чем на 100 заводах Западной Европы и в США, электросварку начали применять не только для вспомогательных ремонтных работ, но и как основной технологический процесс производства новых металлических изделий.

Создателем нового направления в производстве металлических конструкций стал русский инженер Н.Г. Славянов. Способ электросварки угольным электродом Бенардоса еще толь-

ко начинал свое триумфальное шествие по миру, когда на одном из заводов промышленного Урала электрическая дуга загорелась между изделием и стальным стержнем-электродом.

Николай Гаврилович Славянов (23 апреля (5 мая) 1854—1897) родился в Задонском уезде Воронежской губернии. Окончив с золотой медалью гимназию в Воронеже, он в 1872 г. поступил в Петербургский горный институт. Получив специальность инженера-металлурга в 1877 г., Славянов уехал работать на казенный Воткинский горный завод смотрителем механических фабрик. В 1883 г. его назначили управляющим орудийных и механических фабрик Пермских пушечных заводов в Мотовилихе. С 1888 г. стал там горным начальником, а с 1891 г. и до конца жизни занимал должность горного начальника (директора) Пермских пушечных заводов.

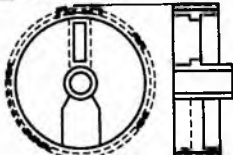
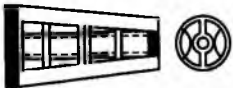
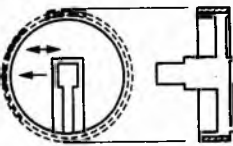
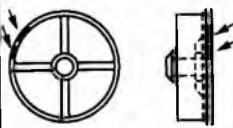
Критически оценив изобретение Бенардоса, Славянов внес в него существенные усовершенствования, касающиеся в первую очередь металлургии сварки. Сварка сталей, содержащих легирующие компоненты и примеси, не всегда получалась удачной, потому что в шов попадали оксидные включения, в нем скапливались сера и фосфор, металл выгорал и становился хрупким в месте сварки.

Славянов заменил неплавящийся угольный электрод металлическим плавящимся электродом — стержнем, сходным по химическому составу со свариваемым изделием. Но самое главное то, что сварочная ванна была защищена слоем шлака — расплавленного металлургического флюса. Такой процесс повышал качество наплавленного металла при сварке.

Кроме того, Славянов разработал специальный сварочный генератор на 1000 А, заменивший аккумуляторную батарею Бенардоса.

К концу 1880-х гг. быстрыми темпами развиваются машиностроение, судостроение, энергетика, в связи с чем растет масса стальных отливок и все дороже обходится брак — трещины, раковины, поры. Славянов начинает применять свой новый способ для исправления дефектов литья, ремонта деталей паровозов, паровых машин, зубчатых колес и т.д. О масштабе решаемых задач в некоторой степени можно судить по сведениям, приведенным в табл. 1.1. Только за 3,5 года на Мотовилихинском заводе было выполнено более 1600 работ по сварке и наплавке различных изделий.

Таблица 1.1. Выписка из «Ведомости о работах, произведенных с помощью электрической отливки горного инж. Славянова в Пермских Пушечных заводах»

Время производства работы	Чертежи вещей	Имя заказчика	Название и назначение поправленной вещи	В чем состояло исправление	Вес	Металл вещи	Отлитый металл	Стоимость годной вещи	Стоимость лома	Расход на электрическую отливку			Прибыль	Подписи, удостоверяющие, что работа произведена удовлетворительно
								Р.К.	Р.К.	Р.К.	Материалы	Стоимость эл. тока		
Январь 1891 г. № 1		Механическая фабрика Пермских пушечных заводов (ППЗ)	Зубчатое колесо от токарного станка	Прилиты одиннадцать зубцов	— 24	Чугун	Чугун	5 —	— 21	1 40	1 11	— 75	1 53	Главный мастер Механической фабрики Д. Белозеров
№ 2		Пароход «Пушкар» Пермский пушечный завод	Пробка-золотник от машины Корлисс-Фарка	Налит на толстый конец слой в 1 1/4" и залиты концы	2 22	Чугун	Чугун	38 25	— 90	4 —	4 85	4 50	24 —	Механик Пермского завода И. Яхонтов
№ 3		Механ. фабр. ППЗ	Зубчатое колесо от строительного станка	Прилито восемь зубцов	3 34	Чугун	Чугун	19 25	1 35	2 25	1 35	— 75	13 55	Главный мастер Механической фабрики Д. Белозеров
№ 4		—	Поршень холодильника от строящегося парохода для г. Мешкова	Залиты две раковины	5 —	Чугун	Чугун	10	— 75	— 75	— 90	— 30	6 30	Смотритель механических фабрик А. Дрейер

Способ Славянова получил диплом первой степени и золотую медаль на Всемирной выставке в Чикаго в 1893 г. за удивительный экспонат из России — металлический 12-гранный стакан высотой 210 мм. Николай Гаврилович наварил на сталь один за другим электроды из бронзы, томпака (сплав меди с цинком), никеля, стали, чугуна, нейзильбера (сплав меди с цинком и никелем). Сделанный из этой многослойной заготовки стакан массой 5330 г представлял сразу всю гамму конструкционных металлов того времени.

Большое внимание Славянов уделял механизации и автоматизации дуговой сварки. Он изготовил и опробовал первый в мире сварочный полуавтомат, элементы которого используются и в современных автоматических сварочных головках. Постоянство длины дуги в определенных пределах оплавления электрода поддерживалось двумя соленоидами, которые втягивали железный сердечник и обеспечивали автоматическую подачу электрода. Внимание, которое Славянов придавал проблеме автоматического регулирования длины сварочной дуги, свидетельствует о его технической прозорливости: он предвосхитил применение механизмов для регулирования длины электрической дуги, имеющих большое значение и в современной технике автоматической сварки.

В 1891 г. Славянов запатентовал свое изобретение во Франции, Германии, Великобритании, Австро-Венгрии, Бельгии, а в 1897 г. — в США.

В России дальнейшее развитие нового технологического процесса электродуговой сварки столкнулось с существенными трудностями: электротехническая промышленность страны была слабо развита. Применение электросварки постепенно сокращалось, а со смертью ее создателя практически прекратилось.

Однако технологический процесс, предложенный Славяновым, не всегда обеспечивал высокое качество соединений, так как плавление стали в дуговом разряде сопровождалось выгоранием углерода, марганца и кремния, при этом сварной шов мог насыщаться кислородом, азотом и водородом. Сварка применялась при изготовлении второстепенных металлоконструкций и неответственных изделий. Эту технологию поддерживали только отдельные энтузиасты. Удачно найденные решения внедря-

лись в практику, развивались, служили очередной ступенью для дальнейшего подъема сварочного производства.

Среди таких ступеней была и идея шведского инженера О. Кельберга покрывать металлические плавящиеся электроды термостойкими неэлектропроводными материалами. Тугоплавкое покрытие было нужно Кельбергу, чтобы выполнить сварку в потолочном положении (предотвратить стекание электродного металла), но оказалось, что оно в некоторой степени защищает расплавленный металл от кислорода и азота воздуха. В 1917 г. американские ученые О. Андрус и Д. Стреса предложили новый электрод — стальной, обернутый полосой бумаги, приклеенной силикатом натрия — жидким стеклом. Бумага стала источником дыма, оттеснявшего воздух из зоны сварки, и, кроме того, дуга возбуждалась сразу, с первого касания и не гасла, как обычно, при незначительном удлинении, благодаря присутствию натрия в обмазке.

Совместными усилиями изобретателей многих стран велись исследования с целью улучшения качества металла шва. К концу 1920-х гг. электроды с обмазкой содержали специальные газообразующие вещества, оттесняющие воздух из зоны сварки; легирующие вещества, которые улучшали состав и структуру металла шва; шлакообразующие компоненты, защищавшие расплавленный и кристаллизующийся металл от взаимодействия с воздухом; и, наконец, стабилизирующие вещества с низким потенциалом ионизации. Изменяя состав компонентов покрытия, получали электроды со специальными свойствами.

Первые крупные сварочные работы в России возобновились и были выполнены под руководством Виктора Петровича Вологодина (1883—1950) на судоремонтном заводе «Дальзавод» во Владивостоке. В 1920 г. он организовал сварочный участок, на котором ремонтировали детали и узлы судов. Многие проблемы Вологдину и его сотрудникам пришлось решать впервые, отступая от традиционных технологий. Экспериментальными исследованиями сварных конструкций на прочность, жесткость и герметичность он доказал, что сваркой можно выполнять не менее ответственные конструкции, чем клепкой. По инициативе Вологодина на «Дальзаводе» в 1923 г. был организован сварочный цех, и одной из первых крупных работ это-

то цеха было восстановление в 1924 г. пролета железнодорожного моста через реку Амур с использованием электросварки. В 1928 г. была сварена конвейерная эстакадная решетчатая ферма пролетом 25 м для погрузочных работ в порту. До 1930-х гг. при сооружении крупных резервуаров применяли клепку. Первый сварной нефтерезервуар в СССР был построен по проекту Вологодина в 1929 г. на станции Большой Невер. Володин активно участвовал в создании крупных цельносварных кораблей и судов.

В 1923 г. на принципе намагничивающей параллельной и размагничивающей последовательной обмоток возбуждения инженером-электротехником Василием Петровичем Никитиным (1893–1956) были разработаны генераторы серии «СМ» (рис. 1.8).

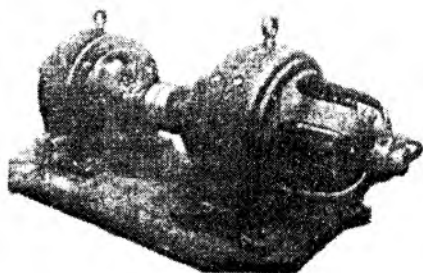


Рис. 1.8. Электросварочный агрегат с генератором СМ-2

В 1924 г. В.П. Никитин разработал сварочный трансформатор СТН. Для небольших сварочных токов он сконструировал трансформатор с внутренним реактивным сопротивлением (рис. 1.9), представляющий собой комбинацию трансформатора и реактивной катушки.

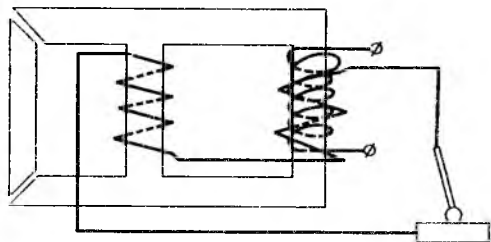


Рис. 1.9. Схема трансформатора Никитина

К концу 1930-х гг. были сформулированы три принципа регулирования тока в сварочных трансформаторах — с несколько-

ми выводами (рис. 1.10, *а*), с магнитным шунтом (рис. 1.10, *б*) и с регулируемым воздушным зазором (рис. 1.10, *в*); каждая схема имеет несколько отличающихся статических вольт-амперных характеристик. Выпуск этого оборудования стал производиться серийно на заводе «Электрик» (г. Санкт-Петербург).

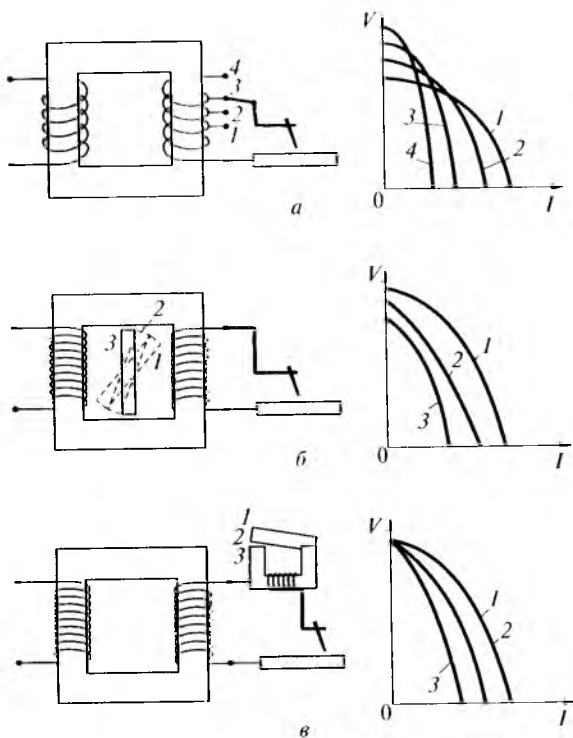


Рис. 1.10. Схемы трансформаторов с различными системами регулирования и соответствующие вольт-амперные характеристики

В дальнейшем Никитин создал теорию и разработал методы расчета электрических машин для дуговой сварки, участвовал в создании электросварочного машиностроения в СССР.

В 1927 г. Алексей Алексеевич Алексеев (1882—1965), окончивший в 1923 г. Петроградский электротехнический институт, разработал машины для контактной сварки, участвовал в создании первого в СССР электротрубосварочного стана, машин контактной сварки для автомобилестроения.

В 1928 г. заводом им. Г.И. Петровского стали выпускаться серийно покрытые электроды для ручной дуговой сварки.

В эти годы крупный ученый, специалист в области мостостроения академик Евгений Оскарович Патон (1870–1953), оценив все, что может дать электрическая сварка, пришел к выводу о том, что сварка будет основой технологии производства металлических конструкций. Он организовал в Киеве при Академии наук УССР электросварочную лабораторию, поставившую перед собой четкую цель широкого применения электросварки вместо клепки в самых разных отраслях промышленности. В январе 1934 г. на базе этой лаборатории был создан Институт электросварки, который в настоящее время носит имя его организатора Е.О. Патона. Одной из наиболее важных задач института Патон считал создание высокопроизводительного механизированного способа сварки, пригодного для изготовления самых ответственных сварных конструкций. К концу 1930-х гг. институту удалось разработать такой способ – сварку под флюсом.

В историю науки Патон вошел как автор классических учебников по мостостроению, создатель оригинальных проектов мостов, глава признанной в мире научной школы по проблемам сварки.

Ученый говорил: «Меня никогда не привлекала работа над решением отвлеченных, оторванных от практики тем. Я стремился к тому, чтобы содержание моих работ и работ моих сотрудников отвечало нуждам народного хозяйства. Что может быть лучшей наградой для человека, чем видеть воплощение своих мыслей, своего труда в жизни?» Всю свою жизнь он неустанно трудился: учил студентов, совершенствовал методы расчетов мостов, создавал оригинальные проекты, участвовал в их осуществлении. Привлекал к этим работам студентов, увлекал их своими идеями, прививая навыки творческого подхода к решению технических задач. Он с большим вниманием относился к работам, выполняемым по заказам промышленных предприятий, рассматривая договор как свидетельство признания полезности выполняемого исследования. В наше время рыночных принципов организации экономики очевидна жизненность таких позиций выдающегося ученого.

1.4. Процесс контактной электросварки

Независимо от изобретателей на Западе Н.Н. Бенардос предложил технологию точечной контактной электросварки – второго из самых распространенных в на-

стоящее время способов сварки металлов. Сущность этого способа в том, что к двум стальным пластинам, помещенным друг на друга, подводится ток с помощью специальных клещей (рис. 1.11), в которые вставлены угольные электроды. Ток протекал через электроды, между которыми зажимались пластины, и выделившейся теплоты было достаточно для образования сварной точки.

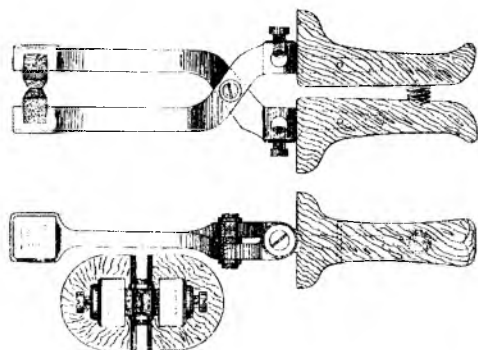


Рис. 1.11. Клещи Бенардоса для контактной сварки

Слава изобретателя стыковой контактной сварки закрепилась за выдающимся американским изобретателем Эльхью Томсоном. Заметим, что в 1870 г., когда ему было только 17 лет, он начал преподавать химию и механику в Центральной высшей школе в Филадельфии, а через несколько лет уже читал лекции во Франклиновском институте.

К 1884 г. Э. Томсоном были созданы необходимые для контактной стыковой сварки элементы оборудования — коммутационная аппаратура, динамо-машина для генерирования переменного тока, подаваемого на трансформатор большой удельной мощности, специальные токоподводящие зажимы. В 1885 г. он разработал технику сварки, довел до безотказной работы сварочную аппаратуру и в начале 1886 г. подал заявку на патент, защищающий принципиально новый способ электрической сварки. Способ Томсона описывается так: «Свариваемые предметы приводятся в соприкосновение местами, которые должны быть сварены, и через них пропускается ток громадной силы — до 200 000 ампер при низком напряжении — 1–2 вольта. Место соприкосновения имеет наибольшее сопротивление для тока и поэтому сильно нагреется. Если в этот момент

начать сжимать свариваемые части и проковывать место сварки, то после охлаждения предметы окажутся хорошо сваренными» (патент США № 347140 от 10.08.1886). Проковка была не просто данью моде, не остатком прежней технологии, а приемом, обеспечивающим повышение качества металла шва.

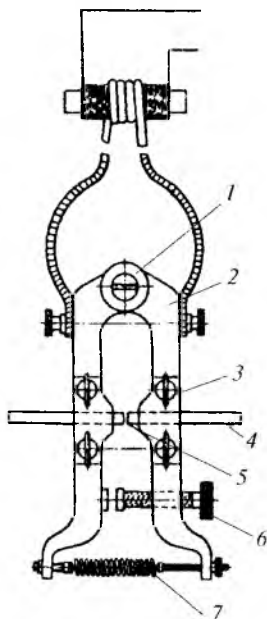


Рис. 1.12. Схема первой установки для контактной сварки:
1 — шарнир; 2 — рычаги; 3 — зажим; 4 — свариваемые детали;
5 — стык; 6 — стопорный винт;
7 — пружина

Поскольку кроме нагрева применялось и механическое сдавливание, первоначально способ называли «электрическая ковка» или «безогненный метод сварки».

С помощью стыковой контактной сварки была решена одна из проблем конца XIX в. — соединение телеграфных проводов. Первое устройство, выполняющее нагрев и сжатие двух проводов, состояло из двух рычагов, на одном конце соединенных шарниром из изоляционного материала, а с другого конца связанных пружиной через изоляционные втулки (рис. 1.12). В этих рычагах посередине зажимались свариваемые детали — провода, стержни и т.п.

В более поздней установке был использован трансформатор с замкнутым контуром (рис. 1.13). На его первичную об-

мотку подавалось напряжение 600 В, и по ней протекал ток силой 20 А. Эта обмотка наматывалась на катушку диаметром 305 мм. Катушку охватывал и виток вторичной обмотки, концы которой подключались через зажимы к свариваемым деталям. По сварочной цепи протекал ток 12 000 А при напряжении 1 В.

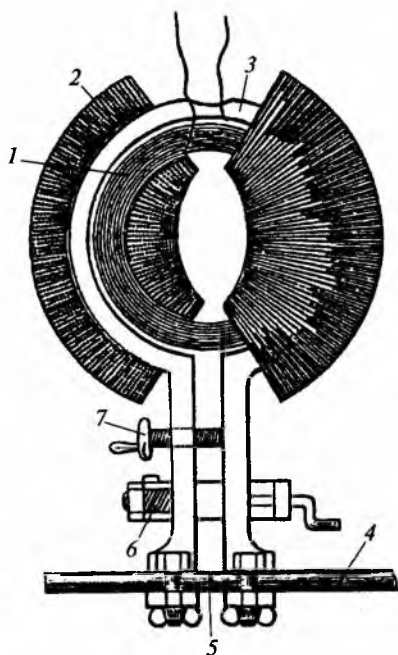


Рис. 1.13. Схема установки для контактной сварки, снабженной трансформатором с замкнутым контуром:

1— сердечник; 2— первичная обмотка; 3 — виток вторичной обмотки; 4 — свариваемые детали; 5 — стык; 6 — пружина; 7 — стопорный винт

Э. Томсон сконструировал установку, в которой ток прерывался синхронно с прикладываемым усилием сжатия. Для развития больших усилий сжатия изобретатель разработал аппарат с гидравлической системой. (Заметим, что механические и гидравлические системы широко применялись еще в древних цивилизациях — китайской, вавилонской, египетской, греческой.) Следующий шаг в развитии стыковой контактной сварки связан с применением импульсов тока и давления.

По мере расширения сферы применения стыковой сварки совершенствовалась ее технология и разрабатывались новые схемы нагрева. Было предложено несколько способов комбинированной (дуговой и контактной) сварки.

Ч.А. Коффин применил сварку стержней большого сечения с предварительным нагревом вибрирующей короткой дугой и разработал технологию сварки с промежуточной угольной пластиной-электродом, подключаемой ко вторичной обмотке и вставляемой на время разогрева между стыкуемыми деталями. В других устройствах между свариваемыми деталями помещали металлическую пластину из материала с удельным электрическим сопротивлением, большим, чем у свариваемого металла, благодаря чему ускорялся нагрев. Ток подводился к концам деталей через угольные контакты. Перед сжатием вставку удаляли. Коффин предложил также подавать магнитное поле через свариваемый участок, считая, что это вызовет структурные изменения, приводящие к уменьшению проводимости свариваемого металла, следовательно, к ускорению нагрева.

В 1892 г. Э. Райс использовал принцип контактной сварки в «кузнечном горне для ювелиров» (установки для контактной стыковой сварки часто называли «электрические горны»). Он предложил помещать пластины, к которым приваривался орнамент из проволоки, на металлическую плиту и подводить к ней ток от вторичной обмотки сварочной машины.

К началу XX в. относятся сообщения об использовании компанией «Фиат» контактной сварки для изготовления авиадвигателей.

В 1928 г. компания «Стаут метл эйрплэйн» (отделение корпорации «Форд мотор») использовала контактную сварку на линиях изготовления конструкций из дюралюмина. В начале 1930-х гг. в США была проведена серия статических и усталостных испытаний на образцах, а затем и на натурных моделях с целью определения возможностей применения контактной сварки конструкций из легких сплавов. Разработанные технологии и оборудование приняли в производство компании «Дуглас», «Боинг» и «Сикорски». В 1935 г. в США был изготовлен монолитный цельносварной балочный фюзеляж.

Однако в конце XIX в. и первые десятилетия XX в. электро-технологии не были широко распространены, потому что электрическая энергия оставалась дефицитной, известные способы сварки не были достаточно универсальными и мобильными, а удовлетворительное качество переплавленного металла обеспечивалось ценой высокой трудоемкости. Но без сварки

уже нельзя было обойтись, и в начале XX в. появился еще один способ, причем не только соединения металлов, но и быстрого эффективного разъединения, основанный на использовании теплоты химических реакций.

1.5. Разработка процесса газовой сварки

Попытки использовать горючие газы для сварки металлов плавлением (безковки), вероятно, предпринимались многократно. Но необходимые для этого температура пламени и концентрация теплоты достигаются только при сжигании горючих газов (или паров горючих жидкостей) в смеси с кислородом. Поэтому газовая сварка не могла быть реализована раньше, чем появилась возможность получать технически чистый кислород в промышленных масштабах.

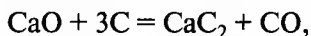
Одновременно с поиском газов велась работа по созданию надежной аппаратуры для сварки. В первую очередь была необходима горелка, обеспечивающая хорошее смешение горючего газа с кислородом, высокую концентрацию теплоты на выходе из сопла и взрывобезопасность. Одной из первых (1847) заслуживающих внимания конструкций была горелка американского изобретателя Р. Хейра для получения водородно-кислородного пламени.

В 1850 г. во Франции С.К. Девиль создал горелку, в которой водород и кислород смешивались еще до выхода наружу (подобная схема используется и в современных сварочных горелках). Температура кислородно-водородного пламени достигала 2600 °С.

В то время в поле зрения инженеров попал ацетилен — газ, теплота сгорания которого в несколько раз больше теплоты сгорания водорода, а температура пламени в смеси с кислородом достигает 3200 °С.

Еще в 1836 г. ацетилен получали из карбида кальция, разлагавшегося в воде. Но тогда карбид кальция был дорогим химическим соединением, получаемым в лабораторных условиях. Только в 1892 г., когда был разработан процесс электрической

выплавки карбида кальция при взаимодействии негашеной извести с коксом



себестоимость карбида кальция снизилась в 1000 раз, что позволило начать его широкое применение для получения ацетилена.

В 1895 г. французский физик Анри Ле Шателье заметил, что кислородно-ацетиленовое пламя не только имеет высокую температуру, но и не окисляет расплавленного железа. Именно такое пламя было необходимо для сварки.

Горелки, в которых кислород и ацетилен смешивались снаружи по выходе из сопла, оказались неработоспособными, так как при горении образовывался твердый плотный нагар углерода, засорявший газовый канал. Французский инженер Ш. Пикап рискнул смешать оба газа непосредственно в горелке, до выхода из мундштука, подобно тому, как Девиль смешивал кислород и водород. Такая конструкция требовала подачи ацетилена под давлением, и горелки работали, когда газ подавался из баллонов.

Однако при транспортировании сжиженного ацетилена в баллонах зачастую происходили взрывы, что тормозило внедрение газовой сварки. Последнее препятствие преодолел А. Ле Шателье, предложивший помещать раствор газа в ацетоне в пористое тело. Баллоны наполняли губкой, а потом заливали ацетон и накачивали ацетилен.

Необходимый для широкого промышленного применения газовой сварки способ получения дешевого кислорода предложил немецкий физик и инженер К. Линде. В 1885 г. он сконструировал и построил первую в мире промышленную установку для получения жидкого воздуха и в 1902 г. создал ректификационный аппарат для разделения воздуха на компоненты. Это открыло дорогу широкому применению кислорода в технике, а уже в начале 1920-х гг. работало несколько заводов по производству кислорода.

Таким образом, к началу XX в. трудами многих ученых и изобретателей был создан еще один способ сварки металлов — ацетилено-кислородная сварка, которая не нуждалась в электрической энергии (правда, для получения карбида кальция и

кислорода требовалось электричество); газосварочные установки были автономны, подвижны, несложны в эксплуатации. Серьезное преимущество этого способа по сравнению со способами Бенардоса и Славянова связано с возможностью просто и эффективно улучшить качество металла шва, защитив пламенем зону сварки от воздействия воздуха. Особенно много сторонников газовой (автогенной) сварки было во Франции и Германии. Здесь усиленно совершенствовали горелки, газовые генераторы для получения ацетилена, клапаны, редукторы, исследовали причины дефектов, выбирали оптимальные режимы сварки и формы разделки кромок.

В России газовая сварка была освоена в 1906 г. Она применялась для исправления брака литья, для изготовления ответственных деталей машин, при ремонте изделий из низкоуглеродистой стали, меди и чугуна, в железнодорожных мастерских.

К 1920-х гг. в сварочном производстве преобладала газовая сварка. Так, ее применили для сооружения магистральных нефтепроводов в 1926–1935 гг. В 1926 г. было создано русско-американское акционерное общество «Рагаз», основная задача которого заключалась в развитии газовой сварки в СССР. Начался выпуск горелок, резаков, редукторов, ацетиленовых генераторов.

Для полной победы «газа над дугой» не хватало только увеличить скорость газовой сварки. Но оказалось, что у нее почти нет резерва ни по мощности, ни по концентрации пламени, тогда как при дуговой сварке проблема увеличения скорости решалась путем увеличения силы тока дуги (до определенного предела). Но пластичность металла шва, полученного дуговой сваркой, была низкой, что зачастую сводило на нет все ее преимущества.

Сущность процесса газовой сварки заключается в следующем. Кислород и ацетилен подаются в газовую горелку по резиновым шлангам, а на выходе из сопла горелки образуется пламя, мощность и состав которого можно регулировать, изменяя расход газа и соотношение между объемами поступающего кислорода и ацетилена. Схема ацетилено-кислородной горелки с двойной регулировкой поступающих газов, а также комплект газосварщика и общий вид передвижного газосварочного поста приведены на рис. 1.14.

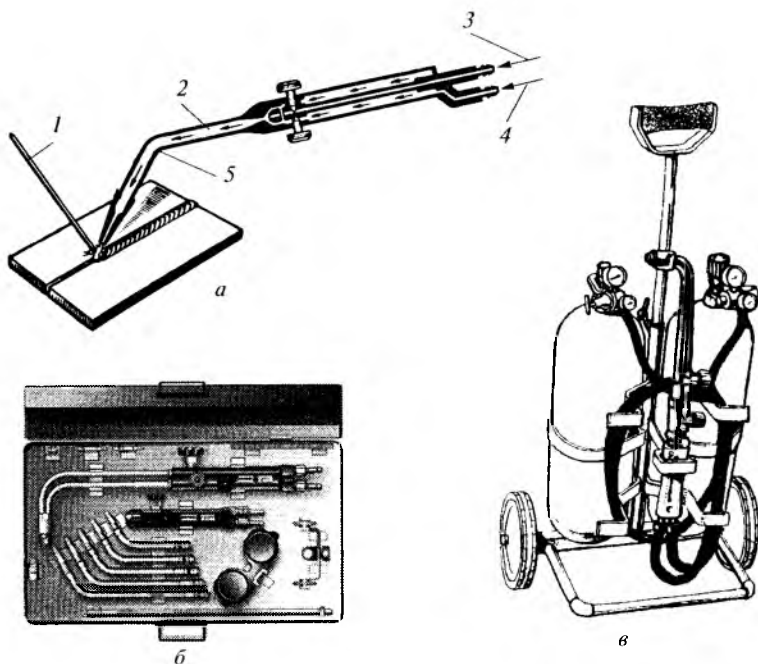
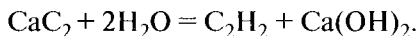


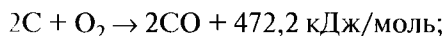
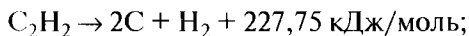
Рис. 1.14. Ацетилено-кислородная газовая сварка:

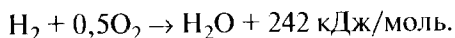
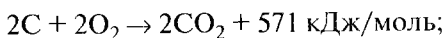
а — схема газовой сварки; *б* — комплект газосварщика; *в* — передвижной пост газовой сварки; 1 — присадочная проволока; 2 — горючая смесь; 3 — кислород; 4 — ацетилен; 5 — наконечник

Ацетилен — газ немного легче воздуха с характерным резким запахом. Основным способом получения ацетилена для газопламенной обработки является взаимодействие карбида кальция с водой:



Молекула ацетилена C_2H_2 представляет собой эндотермическое соединение, требующее для своего образования затраты тепловой энергии 227,75 кДж/моль. При сгорании ацетилена выделяется та теплота, которая пошла на его образование, кроме того, теплота последующего окисления углерода и водорода, входящих в молекулу ацетилена:





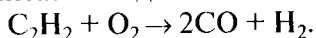
Поэтому ацетилено-кислородное пламя имеет высокую температуру (более 3000 °С).

Ацетилен — опасный газ, так как образует с воздухом в широких пределах (от 2,3 до 82 % ацетилена по объему) взрывчатые смеси.

Ацетилен можно получать на месте сварочных работ в аппаратах, называемых генераторами, или в баллонах, в которых он находится в сжатом состоянии. Баллоны заправляют централизованным путем на ацетиленовых станциях. Газ в баллонах находится над жидким раствором ацетилена в ацетоне под давлением 1,5–1,8 МПа. Баллоны с кислородом окрашены в синий цвет, а штуцер редуктора у них имеет правую резьбу для того, чтобы не перепутать его с каким-либо другим баллоном. Необходимо оберегать баллоны с кислородом, подающую систему и редуктор от попадания масла, так как это может привести к взрыву.

Ацетилено-кислородное пламя (рис. 1.15) состоит из трех зон — ядра 1, восстановительной (средней) зоны 2 и факела 3. В зоне 1 происходит пирогенное разложение ацетилена в присутствии кислорода на углерод и водород; в зоне 2 — сгорание углерода в кислороде, поступающем из горелки; в зоне 3 — дальнейшее окисление продуктов реакций горения и разложения (CO и H_2) кислородом, подсасываемым из окружающей среды. Максимальная температура развивается в средней зоне, где и располагают свариваемый металл (рис. 1.15).

Если объемы поступающих в горелку кислорода и ацетилена примерно равны, то суммарное уравнение горения можно записать в виде



В этом случае металл не окисляется и, наоборот, окисленный металл может восстанавливаться водородом и оксидом углерода. Такое пламя называют нормальным (рис. 1.16, а), оно сохраняет свои восстановительные свойства даже при некотором избытке кислорода.

Если объем кислорода меньше, чем объем ацетилена, то при сгорании ацетилена останутся свободные атомы углерода,

которые будут повышать содержание углерода в поверхностных слоях металла. Этим иногда пользуются, чтобы упрочнить поверхностные слои изделия (рис. 1.16, б).

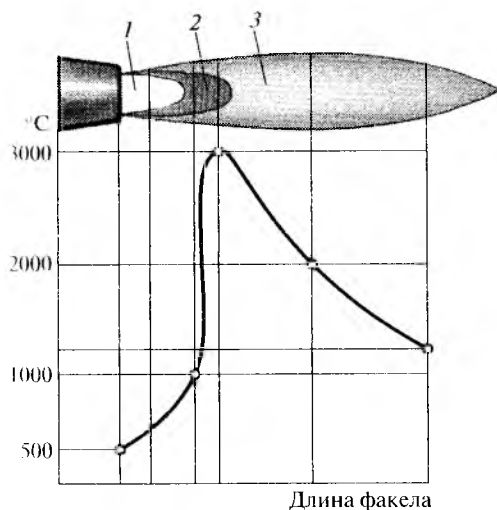


Рис. 1.15. Строение нормального газового пламени и распределение температуры по его длине

Если пламя содержит избыток кислорода, то оно сильно окисляет металл. Такое пламя, называемое окислительным, применяют обычно только для подогрева металла (рис. 1.16, в).

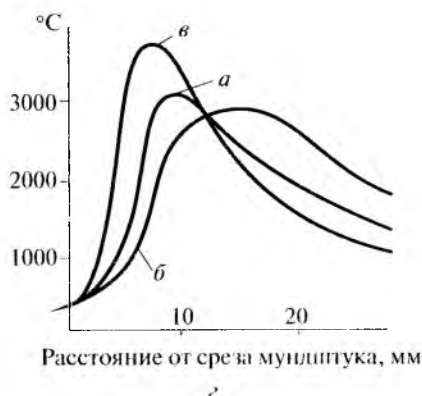
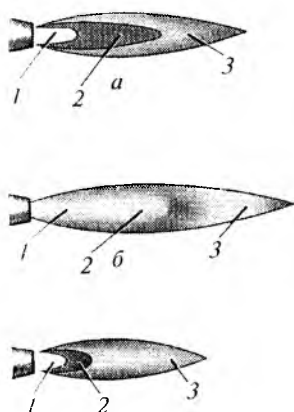


Рис. 1.16. Виды газового пламени (а—в) и их температурная характеристика (г): а — нормальное; б — науглероживающее (избыток ацетилена); в — окислительное (избыток кислорода); 1 — ядро, 2 — восстановительная зона; 3 — факел

В качестве горючего газа при газопламенной обработке можно вместо ацетилена использовать, например, водород. При этом в установках в результате электролиза водных растворов электролита получают водородно-кислородную смесь (гремучий газ) или раздельно водород и кислород. Использование таких установок позволяет осуществлять экологически чистый процесс сварки, а также в значительной мере сократить потребление дефицитного карбида и многомиллионный парк ацетиленовых и кислородных баллонов, требующих для своего обслуживания значительных ресурсов.

В настоящее время имеется много различных конструкций электролизно-водных генераторов.

На рис. 1.17 приведена схема установки для производства рабочей смеси из водорода и кислорода, которая содержит электролитический отсек 1 для разложения воды на рабочую смесь из водорода и кислорода, устройство теплоотвода, антидетонационные устройства 3 и 7, бак охлаждения 4, бак горючей смеси 6, а также электрический пульт управления.

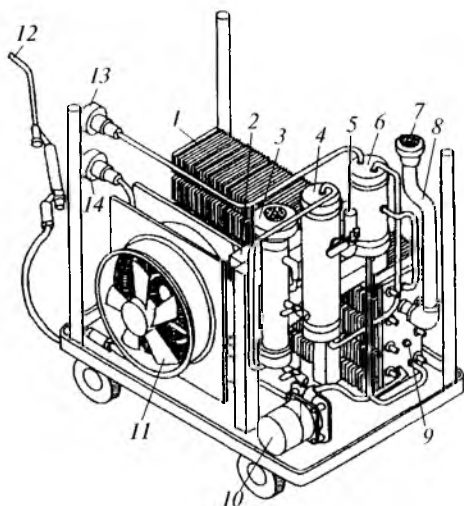


Рис. 1.17. Схема установки для газопламенной обработки материалов

В устройство охлаждения входит спиральная трубка, с внешней стороны которой расположены вентилятор 11 и насос 10 для подачи воды по трубке из электролитического отсека, ко-

торый состоит из двух противоположащих частей. На обратной стороне термопереключателя 9 размещена трубка уровня воды 8, связанная с первым антидетонационным устройством 7, а в передней части — с устройством управления водомерной рейкой, которая находится с наружной стороны. На баке горючей смеси в верхней части электролитического отсека расположены впускные трубы и измерительный прибор давления 13. Причем датчик поддерживает в установке давление от электролитического отсека, измеряет в баке горючей смеси шесть аккумулируемых рабочих смесей из водорода и кислорода и управляет механизмом управления давлением 2. Бак охлаждения в нижней поверхности с выводом выпускного отверстия бака горючей смеси содержит соединенные впускные трубы и вспомогательную трубку 5, через которую поступает газообразное вещество. Второе антидетонационное устройство 3 в нижней части подключено к баку охлаждения с помощью труб, выпускное отверстие в нем связано с установкой поддержания давления, соединенной с датчиком давления 14, и сварочной горелкой 12.

Устройство для раздельного получения газов (рис. 1.18) методом электролиза включает в свой состав биполярный электролизер 2, соединенный с блоком питания 15, емкости (колокола) 6 и 10 для сбора соответственно водорода и кислорода, снабженные трубопроводами 5 и 8 вывода водорода и кислорода с размещенными на них редукторами с вентилями 4 и 9. Клапаны 3 аварийного сброса давления, электролизер, емкости для сбора водорода и кислорода, а также датчик 7 баланса давлений газов установлены в герметичном корпусе 11 высокого давления, который заполнен рабочей жидкостью (водой) для электролиза. Устройство также оборудовано датчиками 13 и 14 уровня рабочей жидкости и блоком управления 12. Насос высокого давления 1, закачивающий рабочую жидкость в герметичный корпус, позволяет накапливать в емкостях для сбора и хранения газы под высоким давлением.

Под действием тока, приложенного к пластинам биполярного электролизера от блока питания, в колоколах собираются водород и кислород и вытесняют жидкость из колоколов электролизера. Когда жидкость достигает нижнего датчика уровня,

блок управления отключает напряжение на электродах электролизера, включает насос и вода или другая рабочая жидкость закачивается внутрь герметичного корпуса. При этом происходит сжатие газа в колоколах электролизера и перемещение его в емкости для сбора газов. При достижении рабочей жидкостью верхнего датчика уровня блок управления отключает насос и подает напряжение на пластины электролизера для продолжения процесса электролиза. Такими циклическими включениями в емкостях газ накапливается до установления необходимого давления, которое затем снижается и газ подается потребителю. В случае аварийной разгерметизации корпуса срабатывают клапаны аварийного сброса газов в систему внешнего аварийного трубопровода, работающие на разности давлений внутри корпуса и в емкостях для сбора газов, что предотвращает спонтанный выброс газа в рабочее помещение. При одновременном использовании наработанных газов срабатывает датчик баланса давлений, который через блок управления кинематически связан с редуктором, и принимаются меры по восстановлению баланса.

Таким образом, данное устройство позволяет вести электролиз с накоплением и хранением газов при высоких давлениях в емкостях внутри герметичного корпуса, использовать простые технические решения в конструкциях бескорпусных электролизеров и получать на выходе устройства газы стабильного давления. Давление внутри емкостей для хранения газа уравновешено давлением жидкости, что обеспечивает безопасность эксплуатации установки.

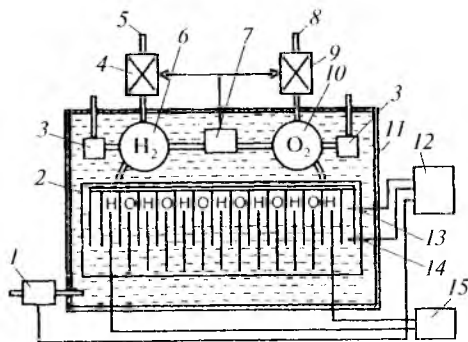


Рис. 1.18. Схема устройства с герметичным корпусом для получения водорода и кислорода

Газопламенная обработка металла водородо-кислородным пламенем, получаемым в современных переносных и передвижных электролизно-водных генераторах, выгодно отличается от обработки пламенем с использованием ацетилена и тем более его газов-заменителей. Единственным, но весьма серьезным ее недостатком применительно к производству сварочных работ является невысокая для сварки сталей максимальная температура пламени — не более 2600°C , тогда как температура сварочного источника теплоты, обеспечивающего стабильный и качественный процесс, должна составлять не менее двух температур плавления металла. Для стали этот показатель равен $2900\text{--}3000^{\circ}\text{C}$.

Существуют такие способы повышения максимальной температуры пламени газовых смесей, как увеличение содержания кислорода в смеси газов, разделение потоков пламени на несколько отдельных струй меньшего размера, предварительный подогрев газов.

Изучение процесса сгорания водорода и углеводорода показало, что для современных конструкций генераторов рациональным способом повышения его тепловой эффективности является насыщение гремучего газа парами углеводородов с большим содержанием углерода. При прочих равных условиях более высокую температуру пламени обеспечивает сгорание углеводородов, содержащих максимальное количество углерода и минимальное количество водорода. Это подтвердили проведенные эксперименты. Насыщение горючей смеси парами углеводородов позволило поднять максимальную температуру пламени на $200\text{--}300^{\circ}\text{C}$, что сопровождалось уменьшением ядра пламени и повышением глубины проплавления металла.

В настоящее время газовую сварку применяют для соединения стальных деталей и узлов небольших толщин, для сварки цветных сплавов с использованием флюсов, которые способствуют растворению образующихся оксидов. Сварка ацетилено-кислородным пламенем эффективна в ремонтных работах. Однако это малопроизводительный процесс, требующий высокой квалификации сварщика. В промышленности газовая сварка практически вытеснена более прогрессивными способами сварки.

1.6. Сварка в годы Второй мировой войны

Во многих странах мира подготовка к Второй мировой войне и сама война дали толчок развитию сварки как новой, перспективной технологии.

В Германии в довоенные годы сварка стала средством обойти ограничения по водоизмещению боевых кораблей, установленные Версальским мирным договором после завершения Первой мировой войны (1919). Не превышая разрешенных 10 тыс. т, конструкторы сумели разместить на крейсерах мощное вооружение благодаря тому, что масса сварного корпуса стала на 15 % меньше, чем клепаного. Корпуса линкоров, подводных лодок изготовляли с помощью ручной дуговой сварки. Бронированные плиты бортов, палуб, башен и рубок сваривали хромоникельмолибденовыми электродами. Темпы строительства кораблей возросли.

Массовое производство самолетов-снарядов «Фау-1» стало возможным за счет применения сварки, с помощью которой изготавливались шарообразные баллоны для сжатого воздуха, необходимого для работы двигателя (рис. 1.19).

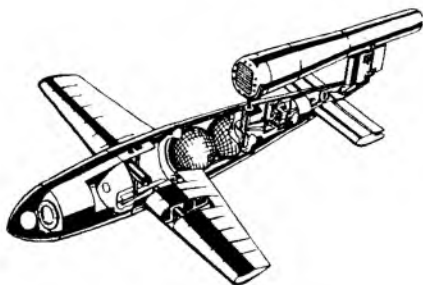


Рис. 1.19. Конструкция «летающей бомбы» «Фау-1»

В Великобритании толчком к развитию сварных конструкций послужило известие о строительстве военного флота в Германии, в том числе подводных лодок. Тогда, чтобы ускорить производство, сварку стали применять для изготовления ответственных узлов корпуса кораблей. К началу войны Великобритания располагала цельносварными кораблями.

С началом Второй мировой войны стало ясно, что техника в этой войне должна сыграть решающую роль. Спрос на сварку повсеместно вырос. Компании, занимающиеся сваркой,

лаборатории вузов и секции сварочных обществ переключались на решение проблем, которые возникали в связи с освоением и увеличением выпуска вооружений. Работы велись в двух направлениях – совершенствование известных технологий сварки с целью ускорения производства и повышение качества вооружения из броневой стали и поиск новых способов сварки.

Одним из основных видов вооружения во Второй мировой войне были танки. С точки зрения технолога-изготовителя танк – сложное инженерное сооружение, состоящее из корпуса и башни (рис. 1.20). Корпус танка собирается из катаных броневых плит толщиной от 45 до 120 мм, которые необходимо соединить в прочную конструкцию. Поэтому инженеру-сварщику приходится рассматривать танк как сооружение, изготавливаемое не только путем получения угловых и стыковых соединений в различных пространственных положениях, но и как сооружение из трудносвариваемого материала.

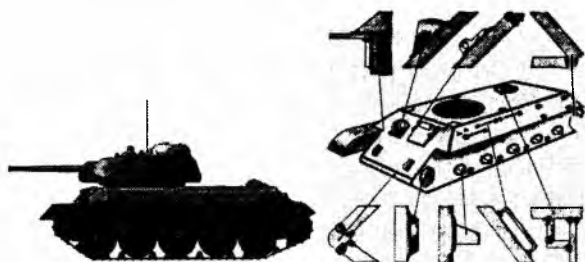


Рис. 1.20. Танк – сложная сварная конструкция

Война требовала десятков тысяч танков. Увеличению выпуска танков препятствовали сварные бронекорпуса. Чтобы выполнить эту работу ручной дуговой сваркой, нужны были тысячи высококвалифицированных сварщиков, но даже в мирное время опытных сварщиков не хватало. Подготовить в кратчайший срок необходимое число специалистов было невозможно. Из создавшегося положения был только один выход – автоматизация процесса сварки.

В это трудное время академик Е.О. Патон приступил к разработке технологии автоматической сварки брони под флюсом. Эта задача была успешно решена: выбраны сварочные материалы, разработан флюс, созданы сварочное оборудование и технология сварки.

Производительность автоматической сварки не шла ни в какое сравнение с производительностью других методов сварки. Например, на приварке подкрылка к борту двумя швами длиной более 5 м квалифицированный сварщик работал около 20 ч. Автоматом неквалифицированный рабочий после 5–10 дней обучения мог сварить этот шов за 2 ч. Сектор погона башни вместо 5-часовой сварки вручную автомат сваривал за 49 мин и т.д.

В отделе сварки Центрального научно-исследовательского института технологии машиностроения (ЦНИИТМАШ) был разработан флюс ОСЦ-45, хорошо зарекомендовавший себя при скоростной автоматической сварке малоуглеродистых сталей, из которых изготавливали боеприпасы (бомбы, снаряды и т.п.). Здесь была также спроектирована и изготовлена установка для контактной сварки рельсов при работе с подвижной платформы. С помощью этой установки, размещенной на рельсосварочном поезде, было сварено в 1942 г. более 30 тыс. стыков.

В годы войны сварочные процессы широко применялись при производстве стрелкового оружия – пистолета-пулемета конструкции Г.С. Шпагина (ППШ) с широким применением штампосварных конструкций; при изготовлении авиационной техники – подмоторных рам самолетов, сварных алюминиевых баков и т.п.; при строительстве барж для ленинградской «дороги жизни»: было изготовлено 14 сварных барж общим водоизмещением 12 тыс. т; при ремонте кораблей, мостов, при аварийных и спасательных работах, для чего в декабре 1942 г. был сформирован специальный поезд для подводной резки, состоящий из электростанции, водолазных станций, сварочных агрегатов, подъемных и плавательных средств и т.д.

Именно в годы войны сварка стала применяться практически без ограничений. Так, в 1944 г. были спроектированы цельносварные доменные печи, башни и мачты высотой 180–200 м и другие ответственные сооружения.

Сварка стала широко использоваться в энергетике. В каждом котельном агрегате тепловой электростанции довоенной постройки имелись три-четыре барабана – огромные цилиндрические емкости со сферическими днищами. Изготовление этой сложной и ответственной конструкции требовало специ-

ального мощного кузнечно-штамповочного оборудования, причем на все виды сварки или подварки был наложен строжайший запрет, так как взрыв котла грозил разрушением электростанции. При отступлении советских войск электростанции выводились из строя взрывом сферической части барабана. Для запуска электростанции требовалась замена барабана, что означало сборку нового котельного агрегата.

В 1943 г. после освобождения оккупированных территорий было принято рискованное по тем временам решение — отремонтировать барабаны сваркой. Предлагалось: вырезать поврежденные участки, из одного барабана сделать заплатки и сварить их в остальные три барабана.

Ручной дуговой сваркой покрытыми электродами с предварительным подогревом свариваемого материала были восстановлены барабаны, которые выдержали гидравлическое давление, в 2 раза превышающее рабочее. Такого применения сварочной дуги мировая практика не знала.

В начальный период войны США сохраняли нейтралитет. В портах страны было интернировано много немецких торговых судов. Но как только США вступили в войну, на всех немецких судах почти одновременно прогремели взрывы. Оказалось, что команды этих судов заранее подготовили взрывы, чтобы не дать американцам возможности использовать немецкий флот против немцев же. Экспертная комиссия, обследовав суда, пришла к выводу, что для их восстановления потребуется не менее 2—3 лет. Тогда морское министерство предложило применить для ремонта судов электродуговую сварку. Через полгода все немецкие корабли под флагом США вышли в море.

С 1940 по 1942 г. объем сварочного производства в США вырос в 3 раза, в основном за счет ручной дуговой сварки электродами с качественными покрытиями и автоматической сварки голой проволокой под флюсом.

В США, стране, значительно удаленной от фронтов, большое внимание уделялось строительству морского транспорта. Была разработана программа, по которой тоннаж флота к 1946 г. планировалось увеличить более чем в 2,5 раза. Не последнюю роль в ускорении строительства играла «преимущественно электродуговая» сварка, почти полностью заменившая клепку. Только в 1942 г. благодаря замене клепаной конструк-

ции и технологии клепки на сварную конструкцию и сварку судов было сэкономлено 500 тыс. т стали. Цикл постройки сократился до 50 дней. На верфи «Ричмонд Ярл» (шт. Калифорния) был поставлен рекорд сборки и сварки корпуса — 4 дня. Для сокращения времени и уменьшения стоимости изготовления, снижения остаточных напряжений и деформаций была разработана схема «расчленения» корпуса на секции (рис. 1.21). Каждая секция сваривалась из отдельных листов и элементов набора, что позволяло изготовлять судно на поточной линии в цехе одновременно на нескольких участках. Для сварки листов обшивки толщиной 20 мм применялась дуговая автоматическая сварка под слоем флюса. Для уменьшения деформаций использовалась многослойная обратно-ступенчатая сварка.

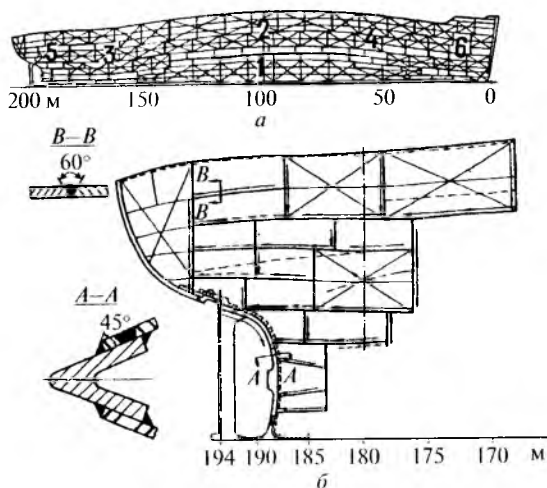


Рис. 1.21. Схема сборки и сварки корпуса судна; цифрами (а) обозначена последовательность сборки корпуса из объемных секций, выделенных утолщенными линиями (б); стрелками показано направление сварки

Сварка применялась также в строительстве американских подводных лодок. В судостроении США впервые был использован способ резки металлов угольной дугой со сжатым воздухом — «Арк эйр», разработанный М. Степатом.

Ручная дуговая сварка покрытыми электродами применялась для соединения стальных деталей и узлов вертолетов и самолетов. Так, фюзеляж истребителя «Вэлиент» собирали из 410 частей: 110 отрезков хромомолибденовых трубок, 295 уголков, кронштейнов и фитингов из хромомолибденовых листов

и т.д. Чтобы ускорить процесс изготовления самолета, было предложено увеличить диаметр применяемых электродов, создать поточную линию с кантователями и упростить конструкцию фюзеляжа.

В период развития военного авиастроения Р. Мередит разработал новый способ дуговой сварки вольфрамовым электродом в инертных газах (TIG) для соединения магниевых сплавов. Дуга при обратной полярности в среде гелия и аргона горела стабильно. При этом применяли присадочную проволоку.

При изготовлении первых атомных бомб также не обошлись без сварки. Применение автоматической сварки под флюсом сократило срок изготовления бомб на 30 дней по сравнению с теми сроками, которые планировались при других технологиях.

Таким образом, с началом Второй мировой войны в странах антигитлеровской коалиции интенсифицировалось применение сварки, что позволило решить многие задачи промышленного строительства, производства вооружений, восстановления народного хозяйства.

1.7. Переход сварки на научные основы

Известные с древнейших времен кузнечная сварка, сварка «заливкой», пайка и способы дуговой, контактной и газовой сварки, нашедшие применение в конце XIX—начале XX в., были созданы опытным, эмпирическим путем (последние — с учетом соответствующих законов физики, химии, электротехники). Поскольку не было глубоких научных обоснований этих технологий, то проблемы, возникающие в процессе работы, решались в основном интуитивно, методом «проб и ошибок». В исполнении некоторых мастеров сварка была чем-то сродни искусству.

В 1930-е гг. электродуговая и газовая сварка внедрялись в производство металлоконструкций. Котлы и корабли, каркасы зданий и детали мостов, автомобили и вагоны — таков был диапазон сварных конструкций, который постоянно расширялся, и, казалось, ничто уже не прервет наступление сварки.

Но в конце 1930-х гг. в Западной Европе и Канаде неожиданно обрушилось несколько мостов, у которых балки были сварные. В тот же период тысячи железнодорожных вагонов в России и других странах были сняты с эксплуатации из-за трещин в сварных рамах и тележках. Эти неудачи заставили многих специалистов относиться к сварке с большой осторожностью. Некоторые инженеры и целые проектные организации решительно выступили вообще против применения сварки при строительстве ответственных сооружений. Дальнейшее распространение сварки зависело от науки, которая должна была установить закономерности развития этого сложного многофакторного процесса и обеспечить осознанное управление им.

В 1930-х гг. в СССР, США и других странах начались научные работы в области сварки, направленные на создание электросварочного оборудования, изучение механических свойств и деформаций сварных конструкций, металлургии и металловедения сварки; были заложены основы общей теории тепловых процессов при сварке концентрированным источником энергии, получены данные о температурных циклах и температурных полях; осуществлялось изучение электрической дуги как наиболее распространенного и перспективного источника теплоты для сварки с точки зрения электронной теории, а затем с учетом роли газов и паров, находящихся вблизи катода.

Кроме того, сформировалось представление о дуговой сварке как металлургическом процессе, определено влияние отдельных химических элементов на свариваемость сталей, предложены критерии пригодности материалов для сварки, найдены частные подходы к решению задач предотвращения трещин и пор в металле шва.

Е.О. Патон и его сотрудники разработали методику исследования несущей способности сварных конструкций, изучили комплексное влияние внутренних напряжений, деформаций, неоднородности механических свойств на служебные характеристики сварных изделий и отдельных узлов, доказали принципиальную возможность создания сварных конструкций ответственного назначения. Е.О. Патоном были сформулированы основные требования к сталям, применяемым для пролетных строений мостов:

- ◊ сталь должна быть менее склонна к переходу в хрупкое состояние в условиях низких температур и при наличии концентрации напряжений, что обусловлено эксплуатацией мостов при температуре до -40°C , а также невозможностью создания конструкций без достаточно резких изменений сечений и других концентраторов; для пролетных строений мостов необходима сталь, не склонная к старению, т.е. к изменению прочностных и пластических свойств от наклепа, под воздействием температурного цикла сварки и времени эксплуатации;
- ◊ сталь должна обеспечивать возможность получения сварного соединения, которое отличалось бы высокой стойкостью против образования трещин в шве, зоне термического влияния и основном металле. Сварное соединение должно иметь достаточную прочность и пластичность.

К настоящему времени данный подход к выбору сталей для автодорожных и железнодорожных мостовых сварных конструкций не потерял своей актуальности.

Первый этап формирования науки о сварке завершился в 1940-х гг., когда по отдельным разделам науки были сформированы основные положения и для их подтверждения накопилось достаточно много экспериментальных данных.

Сегодня в соответствии с ГОСТ 2601–84 принято следующее определение. *Сварка* — процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями при их местном нагреве или пластическом деформировании, или совместном действии того и другого.

1.8. Современная классификация способов сварки

Все способы сварки в зависимости от состояния металла в зоне соединения разделяют на две большие группы:

- ◊ сварка плавлением (в жидкой фазе), когда металл в зоне соединения нагревается выше его температуры плавления;
- ◊ сварка давлением (в твердой фазе), когда температура металла в зоне соединения не превышает температуру плавления свариваемых металлов.

Способы сварки плавлением получили значительное распространение благодаря следующим их преимуществам:

- ◇ возможность сварки в монтажных и цеховых условиях;
- ◇ разнообразие применяемых типов соединений;
- ◇ возможности сварки конструкций различных габаритов;
- ◇ широкий диапазон свариваемых толщин металла — от нескольких микрометров, например при сварке световым лучом, до 1 м и более — при электрошлаковой сварке;
- ◇ возможность сварки швов в любых пространственных положениях;
- ◇ возможность изменения химического состава и свойств наплавленного металла.

Однако сварка плавлением имеет ряд недостатков:

- ◇ кристаллизация металла шва протекает при растягивающих напряжениях, что может привести к образованию трещин;
- ◇ в наплавленном металле возможно образование (особенно при сварке разнородных металлов) хрупких интерметаллидных включений, закалочных структур, развитие ликвационной неоднородности в шве, являющихся причинами возникновения трещин;
- ◇ при сварке могут образовываться напряжения и деформации.

Способы сварки давлением менее универсальны, чем сварки плавлением, но в ряде случаев могут иметь преимущества:

- ◇ значительное расширение диапазона свариваемых материалов, в том числе разнородных металлов, а также неметаллических материалов;
- ◇ исключение возникновения трещин, пористости, уменьшение деформации сварных узлов;
- ◇ менее значительные, чем при сварке плавлением, изменения свойств основного металла;
- ◇ возможность механизации и автоматизации, высокая производительность.

В зависимости от *вида энергии*, используемой для образования сварного соединения, все способы сварки разделяют на три класса:

- ◇ термический — способы сварки, осуществляемые плавлением свариваемых поверхностей с использованием тепловой энергии. К этому классу относят дуговую сварку, плазменную, электрошлаковую, электронно-лучевую, лазерную и др.;

термомеханический — способы сварки, осуществляемые с использованием тепловой энергии и давления — контактная сварка, диффузионная и т.д.;

механический — способы сварки, осуществляемые с использованием механической энергии и давления: холодная сварка, сварка трением, ультразвуковая и т.п.

Существуют и другие классификации способов сварки. Так, способы сварки плавлением можно классифицировать: по характеру защиты свариваемого металла и сварочной ванны от окружающей атмосферы — с газовой, шлаковой, газослаковой защитой;

степени автоматизации процесса сварки — ручная, механизированная и автоматическая;

особенностям введения теплоты — с непрерывным нагревом и импульсным.

В настоящее время существует более 150 способов сварки, но наибольшее распространение получили способы сварки плавлением с использованием электрической дуги. Большинство конструкций, приведенных на рис. В1–В7, изготовлены электродуговой сваркой.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как была получена колонна из весьма чистого железа, находящаяся в Индии?
2. Как в древности изготавливали многослойные высокопрочные самозатачивающиеся клинки мечей?
3. Что такое кузнечная сварка и где она применяется?
4. Какие задачи позволяла решать пайка?
5. В какой стране, когда и кем была изобретена электродуговая сварка?
6. Кто и с какой целью предложил использовать при электродуговой сварке металлические покрытые электроды?
7. Какие способы регулирования тока в сварочных трансформаторах использовал В.П. Никитин?
8. В чем заключался вклад академика Е.О. Патона в развитие сварочного производства?
9. Кто и когда предложил процесс контактной электросварки?

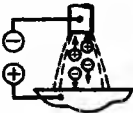
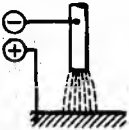
10. В чем сущность процесса газовой сварки, ее достоинства и недостатки?
11. Можно ли использовать воду для осуществления процесса газовой сварки?
12. Какие задачи и как они решались с помощью сварки в годы Второй мировой войны?

ГЛАВА 2 ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ СВАРКИ¹

2.1. Термины и определения

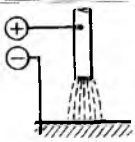
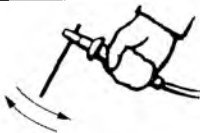
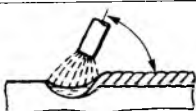
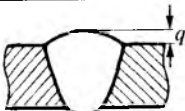
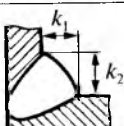
В табл. 2.1 приведены основные термины и определения, характеризующие процесс сварки, которые будут использоваться на протяжении всего учебного пособия.

Таблица 2.1. Термины сварки

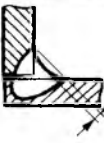
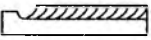
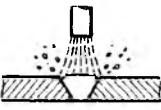
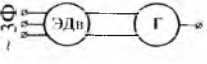
Термин	Внешний вид	Определение	Понятие
Сварка		Технологический процесс получения неразъемного соединения	Получение неразъемного соединения путем образования металлической связи между соединяемыми частями при их нагревании, расплавлении и кристаллизации и (или) пластическом деформировании
Дуга сварочная		Устойчивый электрический разряд между электродом и свариваемым металлом	Плазма — ионизированный газ, в котором присутствуют токопроводящие положительно и отрицательно заряженные частицы (ионы и электроны)
Сварочная техника		Технические средства для реализации процесса сварки	Оборудование, машины, механизмы, вспомогательные устройства, приспособления, инструмент для сварки
Прямая полярность		Способ подключения источника питания постоянного тока	Полярность, при которой электрод присоединяется к отрицательному полюсу источника питания постоянного тока

¹ По одной из версий, происхождение слова «сварка» связано с именем древне-славянского языческого бога Солнца и огня Сварога.

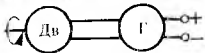
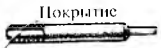
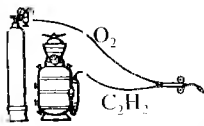
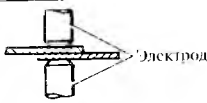
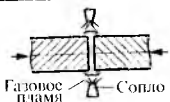
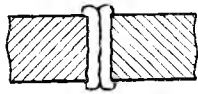
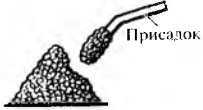
Продолжение табл. 2.1

Термин	Внешний вид	Определение	Понятие
Обратная полярность		Способ подключения источника питания постоянного тока	Полярность, при которой электрод присоединяется к положительному полюсу источника питания постоянного тока
Техника сварки		Характеристика профессиональной подготовки сварщика ручной сварки	Приемы, способы, манипуляции, выполняемые сварщиком в процессе ручной сварки
Сварка углом вперед		Способ ручной дуговой сварки	Дуговая сварка, при которой электрод наклонен под острым углом к направлению сварки
Валик		Наплавленный или переплавленный слой за один проход	Металл очередного слоя, наплавленный на поверхность металла или на предыдущий слой многопроходного шва
Выпуклость сварного шва		Геометрический размер сварного шва q	Расстояние между плоскостью, проходящей через видимые линии границы сварного шва с основным металлом и поверхностью сварного шва в месте наибольшего удаления
Ширина сварного шва		Геометрический размер сварного шва	Расстояние между видимыми линиями сплавления на лицевой стороне сварного шва при сварке плавлением
Корень сварного шва		Нижняя часть сварного шва	Участок сварного шва, наиболее удаленный от его наружной поверхности
Катет сварного шва		Геометрический размер углового шва	Расстояние от линии сплавления углового шва на полке до стыка k_1 и расстояние от линии сплавления углового шва на стенке до полки k_2 ; как правило, $k_1 = k_2$

Продолжение табл. 2.1

Термин	Внешний вид	Определение	Понятие
Вогнутость углового сварного шва (вогнутость шва)		Геометрический размер углового шва	Расстояние между плоскостью, проходящей через видимые линии границы углового шва с основным металлом и поверхностью шва в месте наибольшей вогнутости
Кратер		Дефект шва в виде местного углубления в конце шва	Углубление, образующееся в сварочной ванне под действием давления дуги
Угар		Газообразование	Потери металла на испарение и окисление
Прихватка		Короткий сварной шов	Прерывистый шов для фиксации взаимного расположения деталей, подлежащих сварке
Прямой провод		Сварочный кабель, соединяющий источник питания с электрододержателем	Специальный медный провод в резиновой изоляции
Обратный провод		Сварочный кабель или токопроводящие конструкции и металлопрокат, соединяющие источник питания с электрододержателем	Специальный медный провод в резиновой изоляции или металлопрокат, соединенный сваркой в токопроводящую шину
Преобразователь сварочный		Источник питания сварочной дуги электрическим током	Электротехническая установка, преобразующая механическую энергию в электрическую, необходимую для сварки. Состоит из электродвигателя и генератора

Окончание табл. 2.1

Термин	Внешний вид	Определение	Понятие
Агрегат сварочный		Источник питания сварочной дуги постоянным электрическим током	Электротехническое устройство, преобразующее механическую энергию в электрическую, необходимую для сварки
Покрытый электрод	 Покрытие Металлический стержень	Металлический стержень с прочно нанесенным на его поверхность покрытием из смеси минеральных веществ	Плавающий электрод, содержащий в покрытии элементы, обеспечивающие высокое качество сварного шва
Автогенная сварка	 O_2 C_2H_2	Газовая сварка ацетиленокислородным пламенем, при которой ацетилен вырабатывается газогенератором	Отражает процесс автоматического производства ацетилена (генерации) из карбида кальция при взаимодействии его с водой в газогенераторе
Ацетилен	C_2H_2	Горючий газ	Углеводородное химическое соединение C_2H_2
Электрод	 Электрод	Конструктивный элемент для подвода электрического тока	Деталь из токопроводящего материала — составная часть электрической сети
Газопрессовая сварка	 Газовое пламя Сопло	Разновидность сварки давлением	Сварка, при которой нагрев до пластического состояния выполняется газовым пламенем, а давление создается специальными устройствами
Грат		Внешнее образование на шве при сварке давлением	Металл, выдавленный за счет осадки при сварке
Бура	 Присадок	Порошкообразный бесцветный флюс для сварки, пайки и резки	Натриевая соль борной кислоты (тетраборнокислый натрий) для очистки поверхности металлов от оксидов

2.2. Образование межатомных связей при сварке

На протяжении всего периода существования человека на Земле, в том числе в каменном, бронзовом и железном веках, ему приходилось решать задачу соединения двух или более отдельных частей в единое монолитное изделие, т.е. получать неразъемные сварные соединения. По мере развития общества и создания новых конструкционных материалов со специальными свойствами проблема получения сварных соединений со свойствами, близкими к свойствам этих материалов, становилась все более актуальной и сложной.

Хорошо известно, что конструкционные материалы представляют собой агрегат атомов (ионов), находящихся во взаимодействии. Физические и прочностные характеристики твердых тел определяются расположением атомов (ионов) и химическими связями, действующими между ними.

Все твердые тела сопротивляются как деформации растяжения, так и деформации сжатия. Следовательно, между частицами твердого тела действуют и силы притяжения, и силы отталкивания. При определенном расстоянии между частицами эти силы уравнивают друг друга, что соответствует равновесному состоянию кристалла.

В грубом приближении это можно пояснить с помощью механической модели (рис. 2.1) в виде двух шариков, соединенных натянутым резиновым шнуром и сжатой спиральной пружиной. Шарики находятся в равновесии, так как сила натяжения шнура уравновешена расталкивающей силой сжатия пружины. На самом деле картина значительно сложнее, так как силы взаимодействия между частицами тела находятся в более сложной зависимости от расстояния между ними, чем упругие силы. Теория и опыт показывают, что силы притяжения между частицами твердого тела проявляются уже при таких расстояниях, при которых силы отталкивания еще не сказываются. Те и другие силы возрастают с уменьшением расстояния между частицами, но силы притяжения возрастают значительно медленнее, чем силы отталкивания.



Рис. 2.1. Модель межатомных сил в твердом теле

При образовании металлов атомы сближаются на расстояние $0,0002\text{--}0,0003\text{ мкм}$, когда волновые функции валентных электронов перекрываются, и эти электроны получают возможность переходить от одного атома к другому, довольно свободно перемещаясь по всему объему металла. Поэтому валентные электроны принято называть «коллективизированные», а связь, существующую между ионами, — металлической. Металлическую связь можно представить как связь, возникающую за счет притяжения между решеткой из положительно заряженных ионов и окружающими их «коллективизированными» электронами, оказывающими стягивающее действие.

Для того чтобы сварное соединение обладало теми же свойствами, что и свариваемые материалы, необходимо в зоне соединения (между свариваемыми поверхностями) сформировать такие же химические связи, как и в соединяемых материалах.

Процесс образования сварного соединения объясним, используя схему соединения двух монокристаллов с идеально чистыми и идеально ровными поверхностями (рис. 2.2).

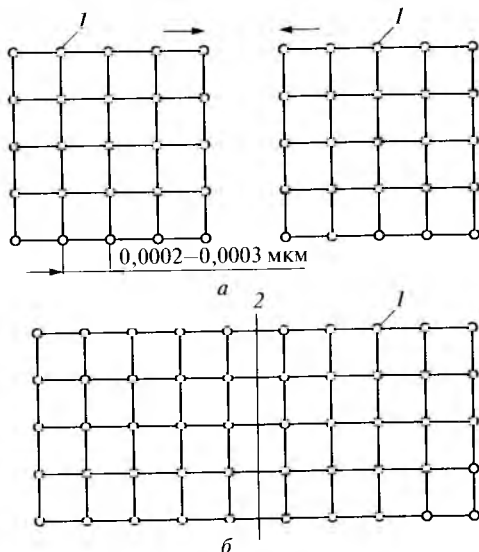


Рис. 2.2. Схема образования сварного соединения между двумя монокристаллами: *а* — до сварки; *б* — после сварки; 1 — ион кристаллической решетки; 2 — граница сварного соединения

Соединение таких монокристаллов (состояние *а*) в единое целое (состояние *б*) произойдет, если сблизить их поверхности на расстояние, равное или близкое параметру кристаллической решетки — 0,0002–0,0003 мкм.

Сварка реальных твердых тел затрудняется рядом факторов. Реальные тела — поликристаллические. Они не имеют идеально чистых и идеально гладких поверхностей. После механической обработки на поверхности металлов присутствуют макроскопическая и микроскопическая геометрические неоднородности — соответственно волнистость и шероховатость. Микровыступы располагаются на волнистой поверхности, шаг которой может составлять от 1000 до 10 000 мкм, а высота — от нескольких микрометров (после шлифования) до десятков микрометров (после токарной и фрезерной обработки), что на несколько порядков больше параметра кристаллической решетки. При сближении таких поверхностей их контактирование произойдет не по всей поверхности, а лишь в отдельных точках (рис. 2.3).

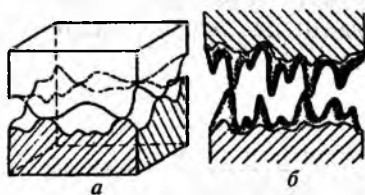


Рис. 2.3. Модель контакта твердых тел по макроскопической волнистости (*а*) и микроскопической шероховатости (*б*) поверхностей

Задача соединения реальных поверхностей металлов в единое целое значительно осложняется, если на контактных поверхностях помимо микровыступов присутствуют оксиды, адсорбированные газы, влага, органические (жировые) загрязнения. Чтобы металлические связи образовались, необходимо удалить с контактных поверхностей загрязнения (наиболее прочными из которых являются оксиды) и обеспечить сплошность физического контакта, т.е. сближение свариваемых поверхностей на расстояние, равное параметру кристаллической решетки, по всей поверхности соединения.

Поэтому при всех способах сварки соединяемые поверхности предварительно подвергают обработке, обеспечивающей удаление поверхностных загрязнений и определенную геометрию поверхности. Однако в атмосфере воздуха на очищенных

поверхностях уже за $2,4 \cdot 10^{-9}$ с образуется мономолекулярный слой газа и как бы ни очищали поверхности металла перед сваркой, они всегда оказываются покрытыми слоем оксида. Наименьшая высота микровыступов на свариваемых поверхностях достигается при их особо чистовом полировании, но и после такой трудоемкой обработки высота микровыступов в сотни раз больше параметра кристаллической решетки.

На практике образование сварного соединения (сближение свариваемых поверхностей, удаление оксидов и образование металлических связей) происходит в процессе пластической деформации свариваемых поверхностей под действием приложенных сжимающих давлений или в процессе их оплавления с последующим самопроизвольным образованием общей сварочной ванны. В связи с этим все способы сварки можно условно разделить на сварку давлением и сварку плавлением.

Сварка давлением может осуществляться без подогрева (холодная сварка) и с подогревом. При холодной сварке необходима деформация более 90 %, в процессе которой происходит смятие микровыступов на свариваемых поверхностях и разрушение оксидных пленок (рис. 2.4).

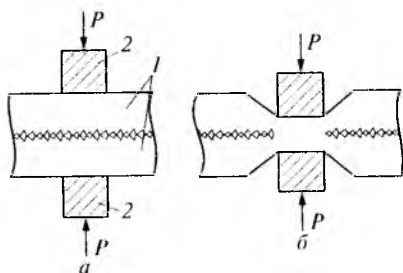


Рис. 2.4. Схема холодной сварки пластин:

а — исходное состояние; *б* — после сварки; *1* — свариваемые пластины; *2* — инструмент для передачи давления (пуансоны)

Подогрев свариваемых заготовок облегчает процесс сварки, и соединение происходит при значительно меньшей деформации (рис. 2.5). При расплавлении металла связи между атомами (ионами) сохраняются в самом металле и на образовавшихся при плавлении краях межфазных границах: твердый металл—жидкий металл. Поэтому для формирования непрерывной межатомной связи достаточно образования общей сварочной ванны и, как следствие, исчезновения границы между соединяемыми поверхностями (рис. 2.6).

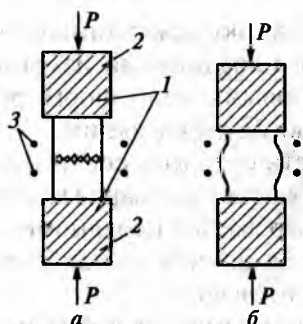


Рис. 2.5. Схема сварки давлением с подогревом:

а — исходное состояние; *б* — после сварки; 1 — свариваемые заготовки; 2 — пуансоны; 3 — нагреватель (индуктор)

Формированию сварного соединения могут препятствовать поверхностные загрязнения, прежде всего оксиды. При этом оксиды могут растворяться в сварочной ванне (например, при сварке сталей, титана и др.) и приводить к загрязнению сварного шва кислородом. Тугоплавкие и нерастворимые в жидком металле оксиды препятствуют сплавлению металла и образованию общей сварочной ванны (например, при сварке алюминия). В таком случае изыскивают приемы, обеспечивающие разрушение и удаление оксидов в процессе сварки.

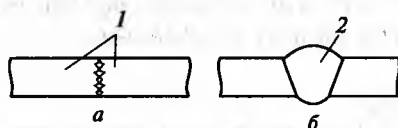


Рис. 2.6. Схема образования соединения при сварке плавлением:
а — исходное состояние; *б* — после сварки; 1 — свариваемые заготовки;
2 — сварной шов

Таким образом, процесс сварки следует рассматривать как совокупность технологических приемов (расплавление свариваемых поверхностей с образованием сварочной ванны, нагрев и деформация свариваемых заготовок и проч.), направленных на установление межатомных связей на границах раздела соединяемых заготовок.

Образование металлических связей между свариваемыми поверхностями является основным и необходимым этапом формирования соединения, но не определяет конечные свойства полученных сварных соединений. Они зависят от ряда

процессов, сопутствующих образованию межатомных связей, благодаря которым в зоне сварного соединения изменяются микроструктура, химический и фазовый состав, формируются внутренние напряжения и развиваются деформации.

Наибольшие отклонения свойств сварного соединения от свойств основного металла наблюдаются при сварке плавлением, так как в этом случае металл нагревается неравномерно по всему объему свариваемых заготовок, причем до наиболее высокой температуры — температуры плавления.

При сварке давлением также могут изменяться фазовый состав и микроструктура свариваемых заготовок, поскольку при сварке металл может нагреваться выше температуры рекристаллизации и фазовых превращений, но эти изменения не столь существенны, как при сварке плавлением.

Поэтому при рассмотрении процесса образования сварного соединения в условиях сварки плавлением (рис. 2.6) следует ознакомиться с закономерностями: нагрева металла, изменения химического состава металла сварного шва, формирования структуры соединения, образования внутренних (сварочных) напряжений, возникающих при неравномерном нагреве и способных вызывать деформации свариваемых конструкций и даже разрушение сварного соединения.

2.3. Нагрев металла при сварке плавлением

Все основные способы сварки плавлением выполняются при местном нагреве свариваемого изделия. Необходимую для нагрева теплоту получают от источников энергии — электрической дуги, газового пламени, электронного луча и др., различающихся по характеру выделения теплоты, мощности, продолжительности действия, скорости движения и другим признакам.

Нагрев и охлаждение металла при сварке вызывают разнообразные физические и химические процессы в металле изделия — взаимодействие с окружающей средой, плавление, кристаллизацию, структурные превращения, объемные изменения, появление напряжений и пластических деформаций.

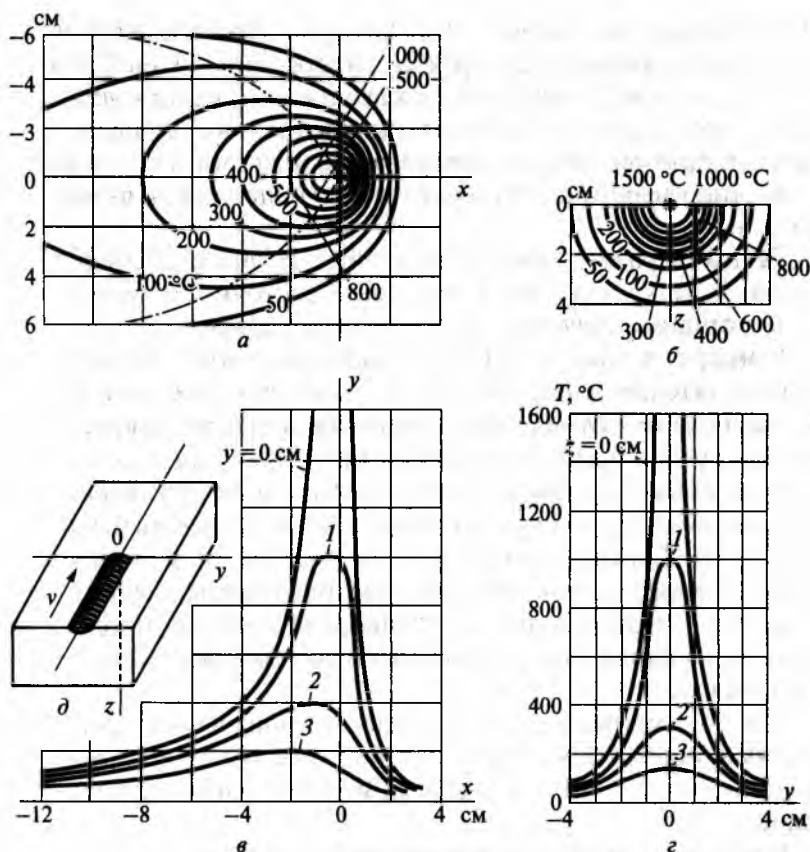


Рис. 2.7. Температурное поле предельного состояния при движении точечного источника теплоты по поверхности полубесконечного тела: $q = 4000$ Дж/с; $v = 0,1$ см/с; $a = 0,1$ см²/с; $\lambda = 0,4$ Дж/(см·с·К); а — изотермы на поверхности xOy; б — изотермы в поперечной плоскости xOz, проходящей через центр источника теплоты; в — распределение температуры по прямым, параллельным оси x и расположенным на поверхности массивного тела; з — распределение температуры по прямым, параллельным оси y и лежащим в поперечной плоскости xOz; д — схема расположения координатных осей

От температурного состояния металла в месте сварки и распределения температур в свариваемом изделии во многом зависит качество сварного соединения. Его прочность, пластичность, ударная вязкость, сопротивляемость коррозии, жаропрочность и другие тепловые процессы при сварке в значительной

степени определяют и такие показатели, как производительность и технико-экономическая эффективность сварки. Неправильно выбранные режимы нагрева и охлаждения изделия в условиях сварки могут привести к появлению дефектов сварных соединений, например трещин, непроваров, подрезов и т.п., а также к усилению деформаций и повышению напряжений в сварном изделии.

Таким образом, многие основные процессы, сопровождающие сварку, связаны с тепловым состоянием металла на разных стадиях получения сварных соединений.

Температурное состояние металла при сварке характеризуется значительной неравномерностью и изменяется в широком диапазоне — от нормальных температур (примерно 20 °С в обычных условиях и даже —30 или 40 °С при сварке на морозе) до весьма высоких температур, сопоставимых с температурой кипения металла для железа (около 3000 °С). Непрерывное и достаточно быстрое изменение температур, характерное для условий сварки плавлением, создает ряд специфических особенностей, затрудняющих изучение самих этих процессов и их влияния на формирование сварного соединения и его конечные свойства.

Для понимания тепловых процессов при сварке и управления ими необходимо знать общие, хотя бы приближенные представления о законах нагрева и охлаждения металла при сварке.

В течение ряда лет многие исследователи экспериментально и теоретически изучали тепловые процессы при сварке, которые в настоящее время можно представить как тепловые основы сварки, являющиеся частью ее теоретических основ.

В разработке тепловых основ сварки и тепловых расчетов при сварке, используемых в настоящее время, основная роль принадлежит советским ученым, в первую очередь академику Н.Н. Рыкалину.

Николай Николаевич Рыкалин (27.05.1903, Одесса — 21.05.1985, Москва) в 1929 г. окончил Дальневосточный государственный университет. С 1939 г. работал в Институте машиноведения АН СССР, с 1941 г. — в секции по научной разработке проблем сварки и электротермии, с 1953 г. руководил лабораторией теории сварочных процессов в Инсти-

туте металлургии им. А.А. Байкова. В 1930-х гг. разработал основные разделы теории тепловых основ сварки и ряда других способов металлообработки. В последующие годы под его руководством разработаны ванная дуговая сварка, сварка металлов ультразвуком, термокомпрессионная сварка, технология обработки сжатой дугой, исследованы металлургические превращения ряда сплавов, электрофизические процессы в дуге и др. Автор более 100 печатных работ, в том числе опубликованных во многих странах мира. Академик АН СССР, член сербской академии наук, награжден почетной медалью Американского сварочного общества, отмечен государственными наградами СССР.

В основу тепловых расчетов, расчетных методов определения температурных полей, скоростей нагрева и охлаждения положены данные о теплофизических величинах и процессах теплообмена. Полученный уровень знаний позволяет определить условия, при которых достигаются необходимый нагрев изделия и его сваривание, а также решать задачи о распределении температур в теле и его изменении во времени в каждом конкретном случае, например, определить температурное поле в полубесконечном теле по заданным значениям тепловой мощности источника теплоты q , скорости его движения v , температуропроводности a и теплопроводности λ (рис. 2.7).

2.4. Особенности формирования химического состава металла шва

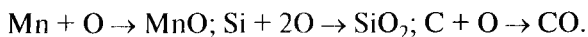
Химический состав металла шва определяется химическим составом свариваемого металла, электродной (присадочной) проволоки и физико-химическими процессами, протекающими в сварочной ванне.

В условиях высокой температуры электрической дуги и металла сварочной ванны происходит диссоциация молекул газов — кислорода, азота, водорода и химических соединений — углекислого газа и паров воды с образованием атомарного кислорода, азота, водорода и углерода, которые становятся весьма активными и реагируют с металлом.

Так, при сварке сталей кислород, взаимодействуя с железом, образует оксиды FeO , Fe_3O_4 , Fe_2O_3 . Для качества шва наиболее опасен оксид FeO , способный растворяться в жидком

металле. После остывания шва из-за невысокой температуры затвердевания FeO остается в нем в виде выделений по границам зерен, что сильно снижает пластичность шва. Чем больше кислорода в шве находится в виде FeO, тем хуже его механические свойства. Высшие оксиды Fe_3O_4 и Fe_2O_3 не растворяются в жидком металле и всплывают на поверхность сварочной ванны в виде шлака.

Кроме железа окисляются и легирующие элементы стали, например марганец, кремний, углерод:



В сварочной ванне легирующие элементы могут окисляться, взаимодействуя с оксидом FeO:



Окисление этих элементов приводит к уменьшению их содержания в металле шва. Кроме того, образующиеся оксиды могут оставаться в шве в виде включений или пор (CO), значительно ухудшающих механические свойства сварных соединений.

Поэтому одним из условий получения качественного металла шва является предупреждение его окисления, для чего в первую очередь создают различные защитные среды. Однако применяемые при сварке защитные меры не всегда обеспечивают отсутствие окисления расплавленного металла. В таких случаях металл шва требуется раскислить.

Раскислением называют процесс восстановления железа из его оксида и перевод кислорода в форму нерастворимых соединений с последующим удалением их в шлак. В общем случае реакция раскисления имеет вид



где Me — раскислитель.

Раскислителем является элемент, обладающий в условиях сварки большим сродством к кислороду, чем железо. В качестве раскислителей применяют кремний, марганец, титан, алюминий. Раскислители вводят в сварочную ванну через электродную проволоку, покрытия электродов, флюсы.

Азот воздуха, попадая в столб дуги, диссоциирует и, находясь в атомарном состоянии, растворяется в жидком металле. В процессе охлаждения азот выпадает из раствора и взаимодействует с железом, образуя нитриды Fe_2N , Fe_4N . Содержание азота в металле шва негативно влияет на его механические свойства, особенно пластичность. Кроме того, при насыщении металла азотом образуются газовые поры.

Водород в зону сварки попадает из влаги покрытия электрода или флюса, ржавчины на поверхности сварочной проволоки и детали, из воздуха. Атомарный водород хорошо растворяется в жидком металле. При охлаждении и особенно кристаллизации сварочной ванны растворимость водорода резко (скачкообразно) уменьшается. Выделившийся водород не успевает полностью удалиться из металла шва, что приводит к образованию газовых пор. Кроме того, атомы водорода, диффундируя в имеющиеся полости, приводят к повышению в них давления, развитию в металле внутренних напряжений и образованию микротрещин.

2.5. Микроструктура сварного соединения

Сварное соединение включает в себя сварной шов, образующийся в результате кристаллизации сварочной ванны; зону сплавления, где металл при нагреве находился в твердожидком состоянии; зону термического влияния, являющуюся частью основного металла, который подвергался тепловому воздействию, вызывающему изменение структуры и свойств.

Сварной шов имеет структуру литого металла, которая сформировалась в результате развития первичной и вторичной кристаллизации.

Первичной кристаллизацией называют переход металла из жидкого состояния в твердое, в результате чего образуются кристаллиты (зерна). Процесс первичной кристаллизации начинается на частично оплавленных зернах основного металла, находящихся на дне сварочной ванны. При многослойной сварке центрами кристаллизации являются поверхности кри-

сталлитов предыдущего слоя. Рост кристаллитов происходит в результате присоединения к их поверхности отдельных частиц (атомов) из окружающего расплава. Каждый кристаллит, растущий от отдельного зерна на границе сплавления, представляет собой группу совместно растущих элементарных столбчатых кристаллов, сросшихся общим основанием, т.е. с оплавленным зерном основного металла.

В зависимости от формы и расположения кристаллитов застывшего металла различают зернистую, столбчатую и дендритную структуру.

При зернистой структуре зерна не имеют определенной ориентации, а по форме напоминают многогранники. Такая структура обычно характерна для металла шва, выполненного покрытыми электродами, при его довольно быстром охлаждении. При столбчатой и дендритной структурах зерна вытянуты в одном направлении, но в столбчатой структуре у них компактная форма, а в дендритной — ветвистая. Такие структуры шов имеет при медленном охлаждении — при сварке под флюсом и электрошлаковой сварке.

Направление роста кристаллов связано с интенсивностью отвода теплоты от ванны жидкого металла: кристаллы растут перпендикулярно границе сплавления в направлении, противоположном отводу теплоты (рис. 2.8).

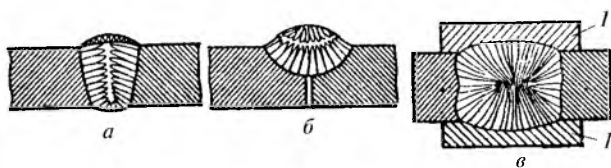


Рис. 2.8. Схемы направления роста кристаллитов при кристаллизации шва: а — с глубоким проваром; б — широкого; в — электрошлакового; *l* — медные ползуны

При сварке сталей на железной основе кристаллиты имеют аустенитную структуру, представляющую собой твердый раствор углерода в γ -железе. При дальнейшем понижении температуры происходят аллотропические превращения, которые проявляются в переходе γ -железа с гранцентрированной кубической решеткой в α -железо с объемно-центрированной кубической решеткой. Это сопровождается изменением строе-

ния металла за счет появления новых образований в пределах первичных столбчатых кристаллитов. Кристаллиты со структурой аустенита распадаются, образуя механическую смесь почти чистого α -железа (феррита) и карбида железа Fe_3C (цементита). Такое явление называется *вторичной кристаллизацией* или *перекристаллизацией*.

При сварке низкоуглеродистой стали в околошовной зоне различают участки (рис. 2.9) сплавления, перегрева, нормализации, неполной перекристаллизации и рекристаллизации; далее идет основной металл, не подвергавшийся действию высоких температур.

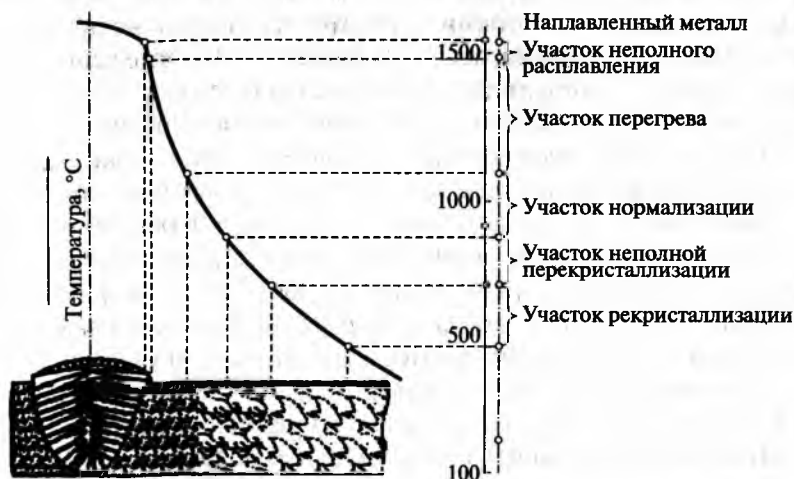


Рис. 2.9. Структура околошовной зоны при сварке низкоуглеродистой стали

Зона сплавления (участок неполного расплавления) непосредственно примыкает к сварному шву. Именно на этом участке происходит сварка. Ширина шва в зависимости от источника нагрева и режима сварки составляет (ориентировочно) 0,1–0,4 мм.

Участок перегрева. На этом участке, где металл был нагрет примерно от 1100 °С до температуры начала плавления основного металла, развивается крупное зерно, что приводит к образованию игольчатой (видманштетовой) структуры. Механические свойства на участке перегрева понижены. Ширина его изменяется в пределах 1–3 мм.

Участок нормализации (перекристаллизации) охватывает часть основного металла, нагретого до температур 900—1100 °С. На этом участке создаются благоприятные условия для образования мелкозернистой вторичной структуры, вследствие чего его механические свойства обычно лучше, чем у основного металла, не подвергавшегося нормализации. Ширина участка составляет 1,2—4 мм.

Участок неполной перекристаллизации включает в себя металл, нагретый до 720—900 °С и подвергавшийся только частичной перекристаллизации из-за недостатка теплоты для перекристаллизации и измельчения всех зерен. Поэтому здесь наряду с довольно крупными зернами основного металла, не изменившимися при нагреве, присутствуют мелкие зерна, образовавшиеся в результате перекристаллизации. Механические свойства такой смешанной структуры невелики.

Участок рекристаллизации наблюдается при сварке сталей, подвергавшихся ранее пластическим деформациям — прокатке, ковке, наклепу, в результате которых часть зерен основного металла сплюснулась и вытянулась, а часть раздробилась. На данном участке металл был нагрет до 500—720 °С, что вызвало его рекристаллизацию, когда из обломков зерен зарождаются и растут новые зерна, размер которых значительно увеличивается. При сварке металла, не подвергавшегося пластической деформации (например, литых деталей), процесса рекристаллизации и соответствующего участка не наблюдается.

Общая ширина зоны термического влияния зависит от вида, способа и режима сварки:

<i>Вид сварки</i>	<i>Ширина зоны термического влияния, мм</i>
Ручная дуговая	3—6
В защитных газах	1—3
Под флюсом	2—4
Электрошлаковая	11—14
Газовая	20—30

При газовой сварке ширина зоны термического влияния велика вследствие большой зоны разогрева основного металла.

2.6. Причины возникновения напряжений и характер деформаций

В процессе изготовления сварных конструкций в них возникают сварочные напряжения и деформации. Сварочные напряжения, превышающие предел текучести металла, вызывают его пластическую деформацию, что приводит к изменению размеров и формы изделия, т.е. к его короблению. Если сварочные напряжения превышают предел прочности, то происходит разрушение сварного шва или соединения — образуются трещины.

Причинами возникновения сварочных напряжений и деформаций являются неравномерное нагревание металла при сварке, литейная усадка расплавленного металла и структурные превращения в металле в процессе его охлаждения.

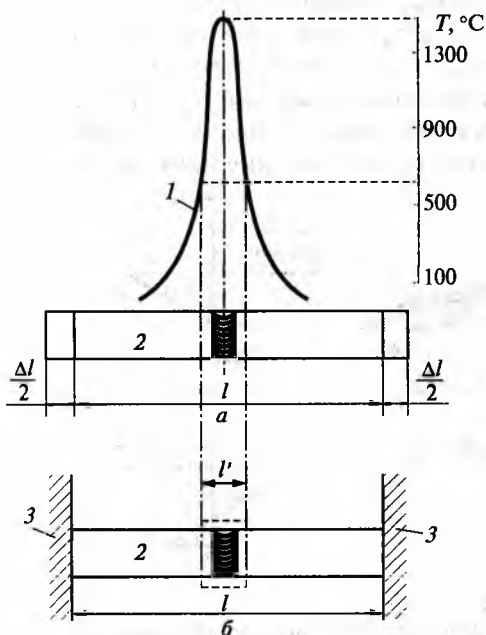


Рис. 2.10. Местный нагрев незакрепленной (а) и закрепленной обоими концами (б) пластин:

1 — кривая распределения температур; 2 — пластины; 3 — жесткое закрепление

Все металлы при нагревании расширяются, а при охлаждении сжимаются. При наличии жестких связей между нагретыми и холодными участками металла это приводит к образова-

нию сжимающих или растягивающих внутренних сварочных напряжений. Рассмотрим несколько примеров.

При местном нагреве пластины, свободно лежащей на сварочном столе, ее длина l увеличится на Δl (рис. 2.10, а). Это увеличение зависит от коэффициента линейного расширения металла, длины нагретой зоны, а также температуры ее нагрева. В процессе охлаждения удлинение будет уменьшаться и при начальной температуре станет равным нулю. После охлаждения размеры пластины станут равными первоначальным и в ней не будет ни внутренних напряжений, ни остаточных деформаций.

При местном нагреве этой же пластины, жестко закрепленной с обоих концов (рис. 2.10, б), она не может свободно удлиняться, поэтому в ней возникнут сжимающие внутренние напряжения. При высокой температуре нагрева (более 600°C) сжимающие напряжения превысят предел текучести нагретого участка, в нем произойдет пластическая деформация сжатия и на длине l' он станет несколько толще. Напряжения сжатия частично исчезнут. При охлаждении пластина должна была бы укоротиться, но этому препятствует жесткое закрепление, в результате чего в ней возникнут растягивающие напряжения.

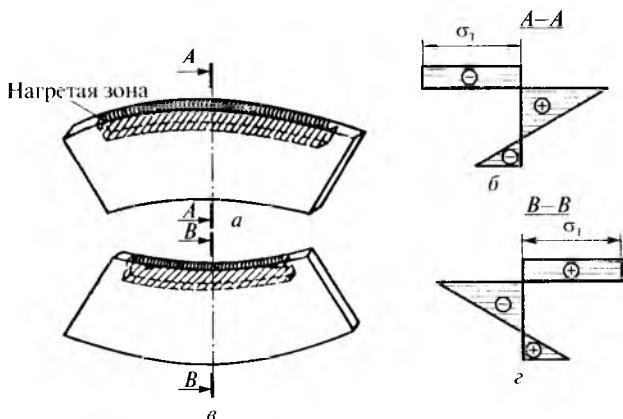


Рис. 2.11. Возникновение напряжений и деформаций при наплавке валика на кромку полосы металла (σ_1 — напряжение предела текучести)

При наплавке валика на кромку полосы возникают аналогичным образом внутренние напряжения и деформации

(рис. 2.11, а). Наплавленный валик и нагретая часть полосы расширяются и растягивают холодную часть полосы, вызывая в ней растяжение с изгибом. Сам валик и нагретая часть полосы сжимаются, поскольку их тепловому расширению препятствует холодная часть полосы. График распределения напряжений показан на рис. 2.11, б, где растягивающие напряжения обозначены знаком «+», а сжимающие — знаком «-». В результате такого распределения напряжений полоса изогнется выпуклостью вверх. В процессе остывания наплавленный валик и нагретая часть полосы, претерпев пластические деформации, должны укорачиваться, но этому процессу будут препятствовать верхние слои холодного металла полосы. Теперь уже наплавленный валик и нагретая часть полосы будут стягивать верхние холодные ее волокна. Они сожмутся, и полоса прогнется выпуклостью вниз (рис. 2.11, в), а остаточные напряжения в ней распределятся, как показано на рис. 2.11, г. В реальных условиях изменение температур от нагретой зоны полосы к холодной происходит плавно, поэтому на графиках распределения температур переход от растягивающих напряжений к сжимающим будет более плавным, чем показано на рис. 2.11, б и г.

В результате остывания и затвердевания жидкого металла сварного шва наблюдается его усадка. Явление усадки объясняется тем, что при затвердевании металл становится более плотным, в результате чего объем его уменьшается. Так как металл шва жестко связан с основным металлом, остающимся в неизменном объеме и противодействующим этой усадке, в сварном шве возникают внутренние напряжения.

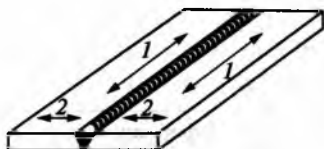


Рис. 2.12. Направления действия продольных 1 и поперечных 2 внутренних напряжений

При сварке происходят продольная и поперечная усадки расплавленного металла, вследствие чего образуются продольные и поперечные внутренние напряжения (рис. 2.12), вызывающие деформации сварных изделий. В результате продольной усадки возникает коробление изделий в продольном на-

правлении (рис. 2.13), а поперечная усадка приводит, как правило, к угловым деформациям, т.е. к короблению в сторону большего объема расплавленного металла (рис. 2.14).

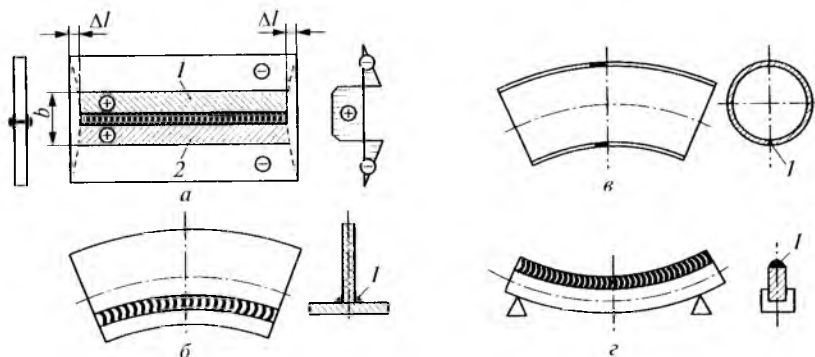


Рис. 2.13. Деформации сварных изделий от продольной усадки наплавленного металла: *а* — при симметричном расположении шва; *б, в* — при несимметричном расположении шва; *г* — при наплавке валика на кромку полосы; *л* — сварной шов; *2* — зона нагрева; Δl — деформация от продольной усадки; *б* — ширина зоны нагрева

При сварке легированных и высокоуглеродистых сталей наряду с тепловыми возникают объемные структурные напряжения. Это объясняется тем, что при охлаждении изменяется структура металла (размеры зерен и их взаимное расположение), что сопровождается изменением объема металла и вызывает внутренние напряжения. При сварке низкоуглеродистых и низколегированных незакаливающихся сталей структурные напряжения очень малы и возникают редко.

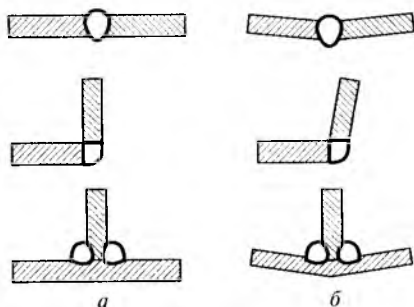


Рис. 2.14. Деформации сварных изделий от поперечной усадки наплавленного металла:

а — до сварки; *б* — после сварки

Еще более сложные процессы протекают при сварке разнородных металлов. Основными трудностями, возникающими

при этом, могут быть металлургическая несовместимость, т.е. различия в структуре, а также различия коэффициентов линейного расширения, теплопроводности и электрической проводимости.

Представления о механизмах и кинетике процессов, протекающих при сварке, непрерывно развиваются.

2.7. Снижение деформаций на стадии проектирования конструкций, до сварки и при выполнении сварки

При выборе метода борьбы с деформациями следует учитывать, что всякое снижение деформаций уменьшает остаточные напряжения, так же как и снижение остаточных напряжений уменьшает деформации.

При проектировании сварных конструкций предусматривают рациональные приемы, обеспечивающие снижение деформаций и напряжений, основными из которых являются следующие:

- ♦ назначение минимальной протяженности и минимального сечения сварных швов, удовлетворяющих при этом требованиям прочности;
- ♦ оптимизация последовательности сборочно-сварочных операций. Например, сборку сложной конструкции целесообразно вести на прихватках, а затем выполнять сварку от наиболее жесткого элемента; постепенное наращивание элементов в сложную конструкцию без сборки на прихватках приводит к большим деформациям.

При назначении последовательности выполнения швов в балочных конструкциях необходимо учитывать жесткость отдельных элементов, что обеспечит снижение деформаций изгиба. Например, двутавровые балки необходимо сваривать в последовательности, указанной на рис. 2.15.

Сварку листовых конструкций для уменьшения деформаций следует назначать или обратно-ступенчатым способом (рис. 2.16, а), или двумя сварщиками одновременно от середины (рис. 2.16, б). Непрерывная сварка от начала до конца дает

значительно большие деформации, особенно при сварке листов малой толщины.

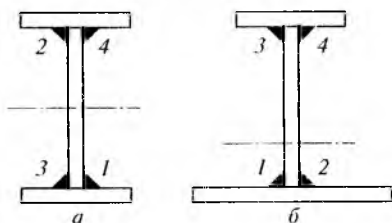


Рис. 2.15. Последовательность сварки двутавровых балок:
а — симметричного профиля;
б — несимметричного профиля

До сварки для снижения деформирования применяют такие приемы, как закрепление деталей в приспособлениях и создание деформаций, обратных сварочным. Закрепляющие приспособления широко используют для сборки и прихватки в тех случаях, когда конструкция состоит из нежестких элементов. Благодаря сборке и прихватке в приспособлениях обеспечивается необходимое взаимное расположение отдельных элементов.

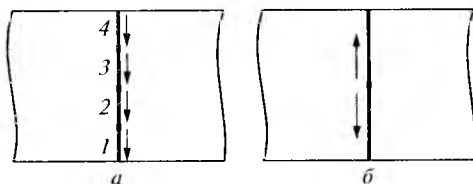


Рис. 2.16. Последовательность сварки листовых конструкций

В процессе сварки изделий в приспособлениях увеличивается жесткость системы изделие— приспособление, вследствие чего уменьшаются перемещения, наблюдаемые при сварке, т.е. временные перемещения, а также устраняются взаимные перемещения элементов конструкции. Остаточные деформации уменьшаются незначительно. Наиболее эффективно применение приспособлений для уменьшения деформаций тонколистовых конструкций.

Зажимные приспособления используют также в тех случаях, когда свариваемые элементы располагают друг относительно друга так, чтобы компенсировать деформации, возникающие при сварке. Типичными примерами перемещений, противоположных сварочному направлению для соответствующей сборки в зажимных приспособлениях, являются сварка встык с угловым

изломом для компенсации угловой деформации (рис. 2.17, а) и электрошлаковая сварка листов большой толщины с переменным зазором для компенсации поперечных перемещений (рис. 2.17, б).

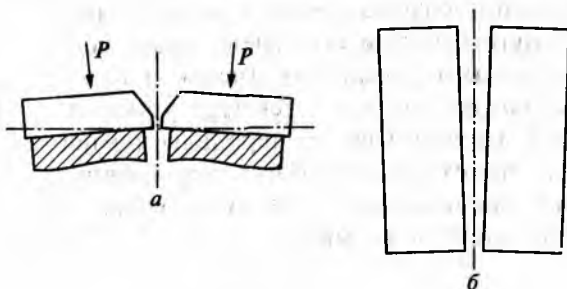


Рис. 2.17. Сборка свариваемых заготовок при многопроходной (а) и электрошлаковой (б) сварке

До сварки используют также метод создания в конструкции деформаций, обратных сварочным. Так, при изготовлении элементов емкостей, оболочек и др. на кромках, которые подлежат сварке, создают пластический выгиб в наружную сторону (рис. 2.18), по величине соответствующий уменьшению диаметра оболочки в районе шва. После сварки оболочка не будет иметь искажений формы.

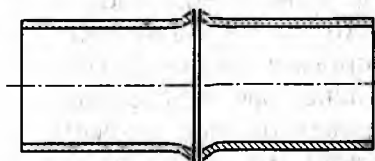


Рис. 2.18. Подготовка свариваемых кромок обечаек под сварку

В процессе сварки для уменьшения деформаций используется метод регулирования теплового воздействия, например за счет уменьшения ширины зоны пластического деформирования, происходящего в результате искусственного охлаждения околошовной зоны в процессе сварки путем использования жидких и пастообразных составов, пропускаемых через специальные прижимы (рис. 2.19).

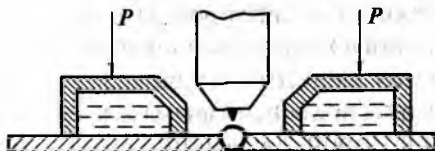


Рис. 2.19. Сварка с охлаждаемыми прижимными приспособлениями

Эффект уменьшения остаточных деформаций может достигаться также путем сопутствующего сварке подогрева. Если при охлаждении околошовных зон сужается интенсивно нагретый участок и соответственно уменьшается пластическое деформирование на стадии нагрева, а значит, и остаточные деформации, то при сопутствующем подогреве двумя ацетилено-кислородными горелками, расположенными слева и справа от сварочного источника теплоты, температурное поле в свариваемой пластине выравнивается, перепады температур становятся меньше, а значит, уменьшаются деформации, так как в незакрепленном равномерно нагретом и охлажденном теле остаточных деформаций не возникает.

2.8. Классификация способов дуговой сварки

Источником теплоты при дуговой сварке служит электрическая дуга, которая горит между электродом и заготовкой или между электродами, или между электродами и заготовкой.

Превращая электрическую энергию в тепловую, электрическая дуга сосредоточивает теплоту в небольшом объеме, что позволяет обеспечить концентрированный ввод теплоты в изделие. Из применяемых в настоящее время источников сварочной теплоты электрическая дуга по плотности энергии, выделяемой в пятне нагрева, занимает третье место (после лазерных и электронных лучей). При этом максимальная плотность энергии в пятне дуги составляет 10^5 Вт/см², а минимальная площадь нагрева — 10^{-3} см².

В зависимости от материалов и числа электродов, а также способа включения электродов и заготовки в цепь электрического тока различают следующие виды дуговой сварки:

- ◇ плавящимся (металлическим) электродом дугой прямого действия (горящей между электродом и заготовкой) с одновременным расплавлением основного металла и электрода, который пополняет сварочную ванну жидким металлом;
- ◇ неплавящимся (графитовым или вольфрамовым) электродом дугой прямого действия, при которой соединение выполняет-

ся путем расплавления только основного металла или с применением присадочного металла;

- ♦ косвенной дугой, горящей между двумя, как правило, неплавящимися электродами; в этом случае заготовка не включена в электрическую цепь и для ее расплавления используются теплота, выделяемая при соприкосновении свариваемой поверхности со столбом (плазмой) дуги, и теплота, получаемая за счет излучения и конвекции; такая дуга применяется, когда требуется ограниченная теплопередача от дуги к изделию (наплавка, напыление);
- ♦ трехфазной дугой, при которой дуга горит между двумя электродами (дуга косвенного действия), а также между каждым электродом и основным металлом (дуга прямого действия).

Питание дуги осуществляется постоянным или переменным током. При применении постоянного тока различают сварку на прямой полярности, когда электрод подключают к отрицательному полюсу (катод), и обратной — электрод подключен к положительному полюсу (анод).

Кроме того, различные способы дуговой сварки классифицируют также:

- ♦ по способу защиты дуги и расплавленного металла — покрытым электродом, под слоем флюса, в среде защитных газов;
- ♦ степени механизации процесса — ручная, полуавтоматическая и автоматическая.

Электродуговой сваркой выполняют соединения (рис. 2.20):

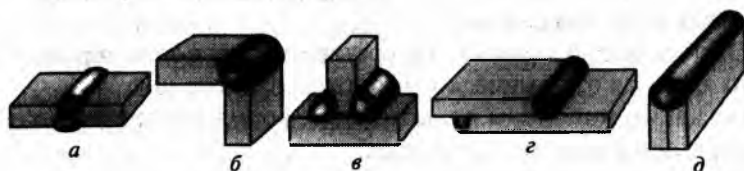


Рис. 2.20. Типы сварных соединений

- ♦ стыковое — сварное соединение двух деталей, расположенных в одной плоскости и примыкающих друг к другу торцовыми поверхностями (рис. 2.20, а). Оно наиболее распространено в сварных конструкциях благодаря своим преимуществам. Условные обозначения стыковых соединений: С1—С48;

- ◇ угловое — сварное соединение двух элементов, расположенных под углом друг к другу и сваренных в месте приложения их кромок (рис. 2.20, б). Условные обозначения: У1—У10;
- ◇ тавровое — сварное соединение, в котором к боковой поверхности одного элемента примыкает под углом (как правило, 90 °С) и приварен торцом другой элемент (рис. 2.20, в). Условные обозначения: Т1—Т8;
- ◇ нахлесточное — сварное соединение, в котором соединяемые элементы расположены параллельно и частично перекрывают друг друга (рис. 2.20, г). Условные обозначения: Н1—Н9;
- ◇ торцовое — сварное соединение, в котором боковые поверхности элементов примыкают друг к другу (рис. 2.20, д). Условных обозначений в стандарте пока нет.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие проблемы общества позволяет решить сварка?
2. На какое расстояние нужно сблизить свариваемые поверхности, чтобы произошло образование металлических связей между ними?
3. Какими техническими приемами можно обеспечить сближение свариваемых поверхностей на расстояние, близкое по величине параметру кристаллической решетки?
4. Какой вид имеет температурное поле при сварке плавлением?
5. От чего зависит химический состав металла шва при сварке?
6. Какую структуру могут иметь сварной шов и зона термического влияния при сварке?
7. Отличается ли химический состав металла в зоне термического влияния от химического состава сварного шва?
8. По каким причинам происходят деформации сварных конструкций и как с ними бороться?
9. Какому из двух металлов следует отдать предпочтение при изготовлении сварного узла, если они имеют равные пределы прочности, но различные относительные удлинения?

ГЛАВА 3 СВАРКА ПЛАВЛЕНИЕМ. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА

3.1. Электрическая дуга и ее свойства

Электрическая дуга — мощный стабильный разряд электричества в ионизированной атмосфере газов и паров металла, покрытий, флюса.

В обычных условиях воздух, как и все газы, обладает весьма слабой электрической проводимостью из-за малой концентрации свободных электронов и ионов. Поэтому для того, чтобы вызвать в воздухе или газе мощный электрический ток, т.е. электрическую дугу, необходимо ионизировать воздушный промежуток (или другую газовую среду) между электродами.

Ионизация возможна в результате электронной эмиссии, когда имеющиеся в металле в большом количестве свободные электроны, обладая достаточной кинетической энергией, переходят в газовую среду межэлектродного пространства и способствуют его ионизации за счет столкновения быстро движущихся электронов с молекулами газов и других элементов, находящихся в межэлектродном пространстве.

Некоторую роль в создании потока электронов может играть «бомбардировка» катода положительными ионами, достигающими электрода с достаточным запасом энергии.

При высоких температурах у значительной части молекул газа достаточно энергии для того, чтобы при столкновениях могла произойти их ионизация; кроме того, с повышением температуры увеличивается общее число столкновений между молекулами газа.

Количество заряженных частиц в межэлектродном пространстве может быть увеличено путем введения в зону горения дуги веществ с низким потенциалом ионизации — калия, натрия, бария, лития, алюминия и др.

Таким образом, электрическая проводимость воздушного промежутка между электродами и соответственно устойчивость горения дуги обеспечиваются эмиссией катода и объемной ионизацией газов в зоне дуги, благодаря которым в дуге перемещаются мощные потоки заряженных частиц.

Процесс зажигания дуги в большинстве случаев включает три этапа — короткое замыкание электрода на заготовку, отвод электрода на расстояние 3–6 мм и возникновение устойчивого дугового разряда.

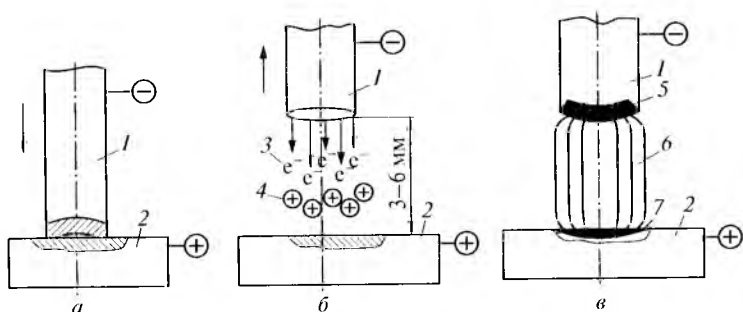


Рис. 3.1. Схема процесса зажигания дуги

При *сварке плавящимся электродом* короткое замыкание (рис. 3.1, а) служит для разогрева торца электрода 1 и заготовки 2. Высокая плотность тока способствует оплавлению микровыступов в контакте и образованию пленки жидкого металла. При последующем отводе электрода пленка жидкого металла растягивается, а ее сечение уменьшается, вследствие чего возрастают плотность тока и температура металла. Это приводит к разрыву пленки и испарению металла. При этом интенсивная эмиссия 4 обеспечивает ионизацию паров металла и газов 3 в межэлектродном промежутке (рис. 3.1, б). По мере разогрева столба дуги и повышения кинетической энергии атомов и молекул происходит дополнительная ионизация за счет их соударения. Отдельные атомы также ионизируются вследствие поглощения энергии, выделяемой при соударении других частиц. В результате дуговой промежуток становится электропроводным и через него начинается разряд электричества. Процесс зажигания дуги заканчивается возникновением устойчивого дугового разряда (рис. 3.1, в).

При сварке неплавящимся электродом возможно зажигание дуги с помощью высокочастотного электрического разряда через дуговой промежуток, обеспечивающего его первоначальную ионизацию. Для этого в сварочную цепь на короткое время подключают источник высокочастотного переменного тока высокого напряжения — осциллятор.

В установившейся сварочной дуге (рис. 3.1, в) различают три зоны — катодную 5, анодную 7 и столба дуги 6. Катодная зона глубиной около 10^{-4} мм — так называемое катодное пятно — расположена на торце катода и является источником свободных электронов. К катоду устремляется поток положительных ионов, которые бомбардируют его и, отдавая свою энергию, накаляют его до $2500\text{--}4000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Столб дуги, расположенный между катодной и анодной зонами, состоит из раскаленных и ионизованных частиц. При ручной дуговой сварке покрытыми электродами температура в этой зоне составляет $6000\text{--}7000\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зависимости от плотности тока; при сварке вольфрамовыми электродами в среде аргона средняя температура в центре столба достигает $15\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в гелии — $20\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При питании дуги постоянным током наибольшее количество теплоты выделяется в зоне анода, так как анод подвергается более мощной бомбардировке заряженными частицами, чем катод, а при столкновении частиц в столбе дуги выделяется меньшая доля общего количества теплоты.

Тот факт, что температура катодной и анодной зон и количество теплоты, выделяющейся в этих зонах, неодинаковы, используется при решении технологических задач.

При сварке деталей, требующих подвода большого количества теплоты для подогрева кромок, применяют прямую полярность. При сварке тонкостенных изделий, тонколистовых конструкций, а также сталей, не допускающих перегрева (высокоуглеродистые, нержавеющие, жаропрочные и др.), применяют сварку током обратной полярности. При этом обеспечивается меньший нагрев свариваемой заготовки и ускоряется процесс расплавления электродного материала.

Электрические свойства дуги описываются статической вольт-амперной характеристикой (ВАХ) — зависимостью меж-

ду напряжением и током дуги в состоянии устойчивого горения (рис. 3.2, а).

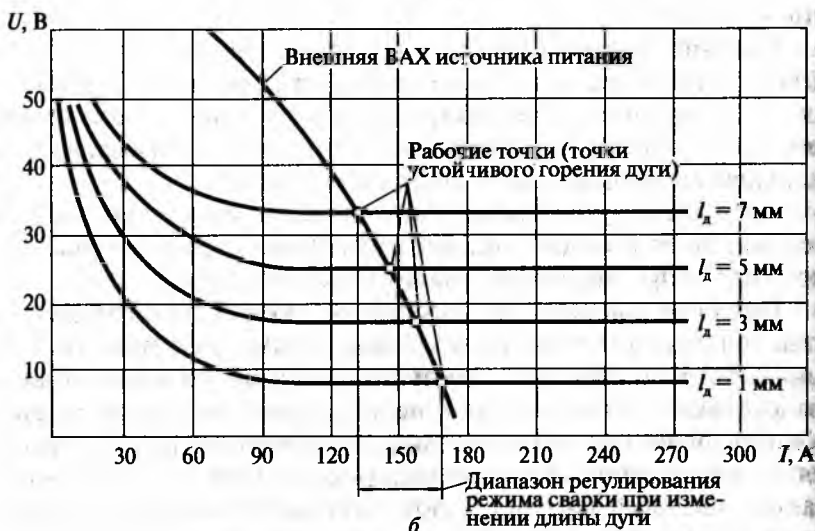
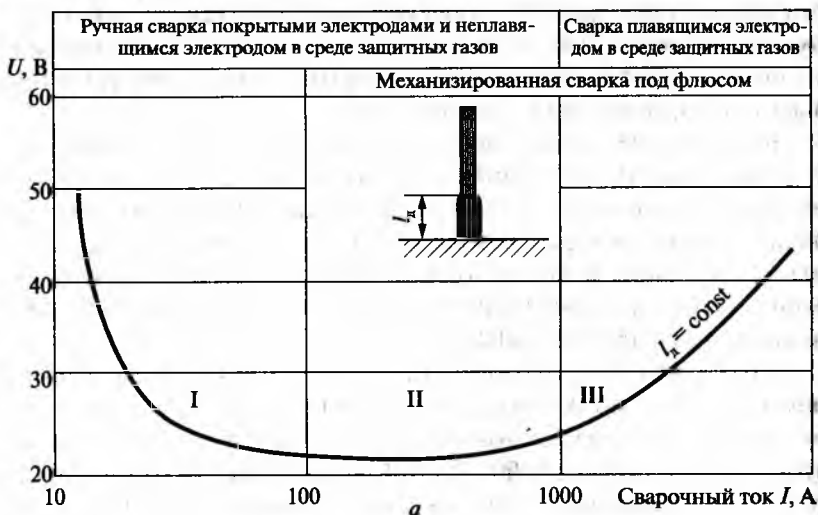


Рис. 3.2. Статическая ВАХ дуги (а) и зависимость напряжения дуги U, B , от ее длины $l_d (б)$

Вольт-амперная характеристика дуги имеет три области — падающую *I*, жесткую *II* и возрастающую *III*. В области *I* (до 100 А) с ростом тока напряжение значительно уменьшается, поскольку увеличивается поперечное сечение и соответственно проводимость столба дуги. В области *II* (100–1000 А) при увеличении тока напряжение сохраняется постоянным, так как сечение столба дуги и площади анодного и катодного пятен увеличиваются пропорционально току; область *II* характеризуется постоянством плотности тока. В области *III* напряжение возрастает вследствие того, что повышение плотности тока более определенного значения не сопровождается увеличением катодного пятна ввиду ограниченности сечения электрода. Дуга области *I* горит неустойчиво и поэтому имеет ограниченное применение. Дуга области *II* горит устойчиво и обеспечивает нормальный процесс сварки.

Каждому участку характеристики дуги соответствует определенный характер переноса расплавленного электродного металла в сварочную ванну: *I* и *II* — крупнокапельный, *III* — мелкокапельный или струйный.

3.2. Источники питания сварочной дуги

Важным условием получения сварочного шва высокого качества является устойчивость процесса сварки. Для этого источник питания должен обеспечивать легкое и надежное возбуждение дуги, ее устойчивое горение в установившемся режиме, регулирование мощности (тока).

Чтобы возбудить дугу в атмосфере воздуха даже при небольшом расстоянии (несколько миллиметров) между электродом и свариваемым изделием, требуется очень высокое напряжение. Поэтому напряжение холостого хода источника питания должно быть достаточным для возбуждения дуги и в то же время не должно превышать нормы безопасности. Максимально допустимое напряжение холостого хода установлено 90 В для источников постоянного тока, 80 В для источников переменного тока.

Источник питания должен обеспечивать быстрое установление или изменение напряжения в зависимости от длины ду-

ги. Время восстановления рабочего напряжения от 0 до 30 В после каждого короткого замыкания должно быть не более 0,05 с.

Источник тока должен выдерживать частые короткие замыкания сварочной цепи, при этом ток короткого замыкания не должен превышать сварочный ток $I_{\text{св}}$ более чем на 40–50 %.

Для стабильного горения дуги требуется равенство тока и напряжения дуги току и напряжению источника питания:

$$I_{\text{д}} = I_{\text{п}}; U_{\text{д}} = U_{\text{п}}.$$

Для этого необходимо соответствие внешней ВАХ источника, т.е. зависимости напряжения на его выходных клеммах от тока в электрической цепи, и статической ВАХ дуги.

Внешняя характеристика может быть: падающая 1, пологопадающая 2, жесткая 3 и возрастающая 4 (рис. 3.3, а).

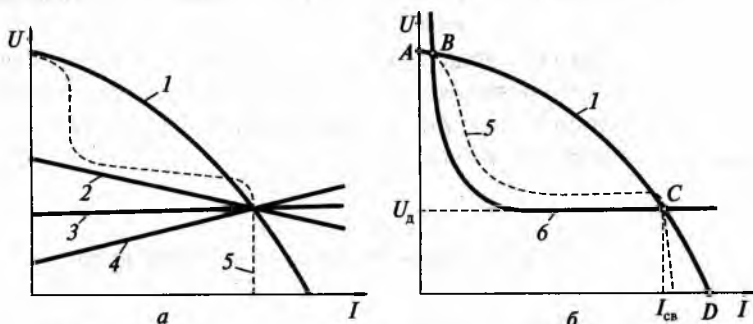


Рис. 3.3. Внешние характеристики источников сварочного тока (а) и соотношение характеристик дуги и падающей характеристики тока при сварке (б)

Для питания дуги с жесткой характеристикой применяют источники с падающей или пологопадающей внешней характеристикой (ручная дуговая сварка покрытыми электродами, автоматическая под флюсом, сварка в защитных газах неплавящимся электродом). Режим горения дуги определяется точкой пересечения характеристик дуги 6 и источника тока 1 (рис. 3.3, б). Точка С соответствует режиму устойчивого горения дуги, точка А — режиму холостого хода в работе источника питания, характеризующему повышенным напряжением в период, когда дуга не горит и сварочная цепь разомкнута, точка D — режиму короткого замыкания при зажигании дуги и ее замыкании каплями жидкого электродного металла. Короткое замыкание ха-

рактизуется низким напряжением, стремящимся к нулю, и повышенным, но ограниченным током.

Источники сварочного тока с падающей характеристикой обеспечивают облегчение зажигания дуги за счет повышенного напряжения холостого хода, устойчивое горение дуги и практически постоянную проплавляющую способность дуги, так как колебания ее длины и напряжения (особенно значительные при ручной сварке) не приводят к существенным изменениям сварочного тока, ограничение тока короткого замыкания, чтобы не допустить перегрева токопроводящих проводов и источников тока. Наилучшим образом приведенным требованиям удовлетворяет источник тока с идеализированной внешней характеристикой 5 (рис. 3.3).

Для обеспечения устойчивости горения дуги с возрастающей характеристикой применяют источники сварочного тока с жесткой или возрастающей характеристикой (сварка в защитных газах плавящимся электродом и автоматическая под флюсом током повышенной плотности).

Для питания сварочной дуги применяют источники переменного тока (сварочные трансформаторы) и источники постоянного тока (сварочные выпрямители и преобразователи).

Сварочный трансформатор (рис. 3.4) состоит из корпуса 1, внутри которого укреплен замкнутый магнитопровод 4 (сердечник) из отдельных пластин, отштампованных из тонкой (0,5 мм) листовой электротехнической стали. На боковых стержнях магнитопровода расположены катушки первичной 12 и вторичной 11 обмоток трансформатора. Катушки первичной обмотки укреплены неподвижно и включаются в сеть переменного тока. Катушки вторичной обмотки подвижны, и от них сварочный ток подается на электрод и изделие. Провода сварочной цепи присоединяются к зажимам 2. Сварочный ток плавно регулируется путем изменения расстояния между первичной и вторичной обмотками. Для этой цели служит вертикальный винт 9 с ленточной резьбой, который оканчивается рукояткой 5. При вращении рукоятки по часовой стрелке вторичная обмотка приближается к первичной, магнитная связь между ними увеличивается и сварочный ток растет. Для установления необходимого сварочного тока на крышке 8 корпуса трансформатора расположена шкала 7.

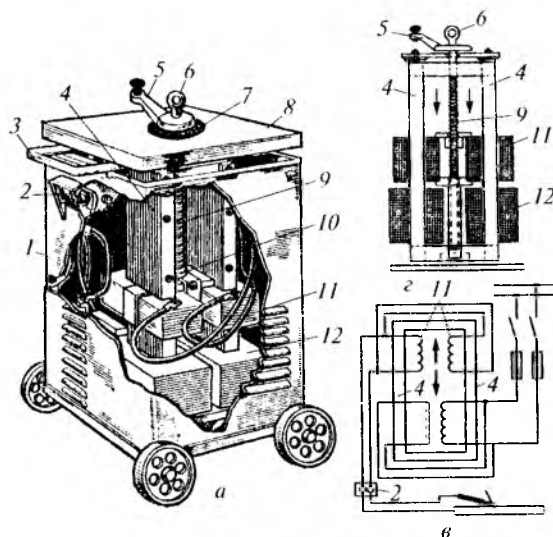


Рис. 3.4. Сварочный трансформатор:

а — внешний вид; *б* — схема регулирования сварочного тока; *в* — электрическая схема

Сварочный выпрямитель (рис. 3.5) состоит из понижающего трехфазного трансформатора с подвижными катушками, выпрямительного блока с вентилятором, пускорегулирующей и защитной аппаратуры, смонтированных в кожухе 11. Понижающий трехфазный трансформатор снижает напряжение сети до необходимого рабочего, а также служит для регулирования сварочного тока путем изменения расстояния между первичной 10 и вторичной 7 обмотками. Катушки вторичной обмотки неподвижны и закреплены у верхнего ярма. Катушки первичной обмотки подвижны. Сердечник 8 трансформатора собран из пластин электротехнической стали. Внутри сердечника проходит ходовой винт 9 с закрепленным внизу подпятником. В верхнюю планку крепления первичной обмотки запрессована ходовая гайка. При вращении рукоятки 4 ходового винта вертикально перемещается ходовая гайка, а следовательно, и катушки первичной обмотки. Выпрямительные блоки 6 собраны по трехфазной мостовой схеме. Для охлаждения выпрямительных блоков служит вентилятор 1, приводимый во вращение от асинхронного электродвигателя 2. Ох-

лаждающий воздух засасывается внутрь кожуха, проходит через блок, омывает трансформатор и выбрасывается с другой стороны.

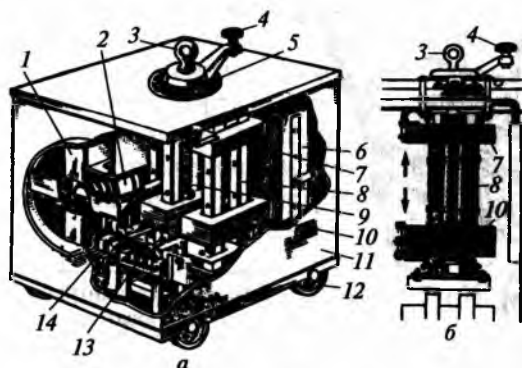


Рис. 3.5. Сварочный выпрямитель:
а — внешний вид;
б — схема регулирования сварочного тока

Сварочный преобразователь (рис. 3.6) служит для преобразования переменного тока в постоянный сварочный ток и включает в свой состав сварочный генератор постоянного тока и приводной трехфазный асинхронный электродвигатель 8, сидящие на одном валу и смонтированные в общем корпусе. Сварочный генератор состоит из корпуса 11 с укрепленными на нем магнитными полюсами 10 и приводимого во вращение якоря 12. Тело якоря набрано из отдельных лакированных пластин электротехнической стали. В его продольных пазах уложены витки обмотки. Коллектор состоит из большого числа изолированных друг от друга медных пластинок 1, к которым припаяны начала и концы каждой группы витков якоря. Магнитное поле внутри генератора создается магнитными полюсами обмоток возбуждения, которые питаются постоянным током от щеток 2 самого генератора. В распределительном устройстве 4 размещены пакетный выключатель, регулировочный реостат 3, вольтметр 6, доски зажимов 5 высокого и низкого напряжения и другая аппаратура. При включении электродвигателя якорь начинает вращаться в магнитном поле и в его витках возникает переменный ток, который с помощью коллектора преобразуется в постоянный. К коллектору прижимаются угольные щетки 2, с помощью которых постоянный ток снимается с коллектора и подводится к зажимам 5 («+» и «-»), к которым присоединяют сварочные

провода, подводящие сварочный ток к электроду и изделию. Для охлаждения преобразователя во время работы на его валу предусмотрен вентилятор 7.

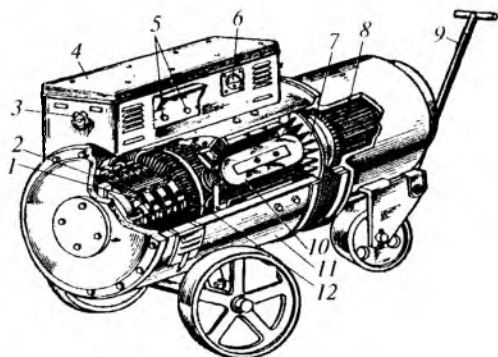
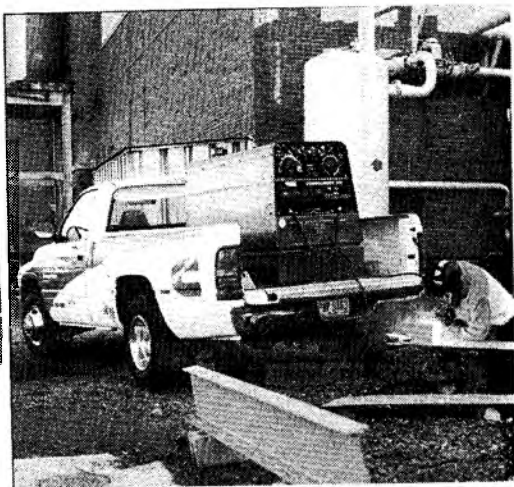


Рис. 3.6. Сварочный преобразователь

Сварочный агрегат (рис. 3.7) преобразует механическую энергию двигателя внутреннего сгорания (бензинового или дизельного) в электрическую требуемого напряжения и тока и конструктивно состоит из двигателя внутреннего сгорания и сварочного генератора с самовозбуждением.



а



б

Рис. 3.7. Общий вид (а) и пример применения (б) сварочного дизельного агрегата Commander 500 компании «Lincoln Electric»

Наиболее широкое применение находят источники переменного тока благодаря простоте конструкции, меньшему расходу электроэнергии, высокому КПД и другим экономическим показателям. Однако в некоторых случаях (сварка на малых токах покрытыми электродами и под флюсом) при питании переменным током дуга горит неустойчиво.

Некоторые сорта легированной стали лучше сваривать, используя источник постоянного тока. При его применении повышается устойчивость горения дуги, улучшаются условия сварки в различных пространственных положениях, появляется возможность вести сварку на прямой и обратной полярностях и т.д.

Понятие «инвертор» происходит от латинского «*inverto*» — переворачиваю, изменяю.

Инверторный источник сварочного тока (общий вид и функциональная схема) показан на рис. 3.8. Напряжение сети промышленной частоты (в данном случае трехфазной, 380 В) преобразуется входным выпрямителем в постоянное 500 В. Это напряжение в свою очередь преобразуется с помощью инвертора в переменное напряжение повышенной частоты (десятки килогерц), которое поступает на понижающий высокочастотный трансформатор. Вторичная обмотка трансформатора нагружена на диодный выпрямитель, к выходу которого через сглаживающий дроссель подключены электрод и изделие.

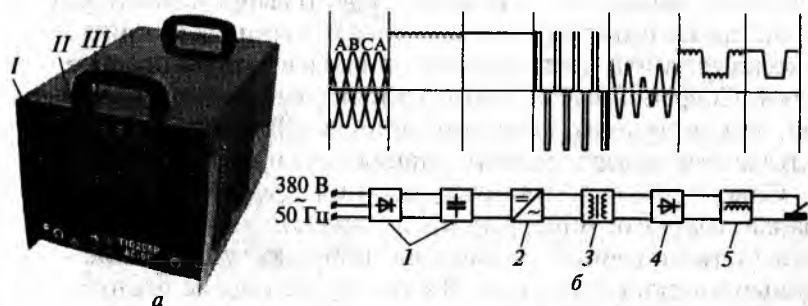


Рис. 3.8. Общий вид (а) и функциональная схема (б) инверторного источника сварочного тока:

I — выключатель питания; II — переключатели диапазонов сварочного тока; III — клеммы подключения сварочных кабелей; 1 — выпрямитель (сетевой); 2 — инвертор; 3 — трансформатор; 4 — выходной выпрямитель; 5 — дроссель

Питание трансформатора напряжением высокой частоты позволяет существенно уменьшить массу и габариты трансформатора. Так, при частоте питающего напряжения 10 кГц масса трансформатора и его габаритные размеры меньше, чем на частоте 50 Гц, примерно в 3 раза, а на частоте 50 кГц уже в 15–17 раз. Например, расчетная масса трансформатора мощностью 20 кВ·А при питании напряжением частотой 50 Гц составляет 120 кг, а при 50 кГц — 7 кг. Такое уменьшение массы активных материалов обуславливает существенное (в 25 раз) снижение потерь мощности, а значит, рост КПД источника питания. Росту КПД способствуют также малые коммутативные потери в ключевых элементах, в качестве которых для сварочных инверторов используют достаточно мощные тиристоры или транзисторы.

В первых образцах инверторных источников питания для дуговой сварки, которые появились в начале 1980-х гг., использовались инверторы на тиристорах. В настоящее время в мировой практике тиристорные инверторы для сварочных источников питания применяются редко из-за сравнительно низкой частоты преобразования, которая зависит от времени выключения тиристоров. Так, современные быстродействующие тиристоры с минимальным временем выключения 20 мкс позволяют получить предельную частоту всего 5 кГц. Инвертирование на более высокой частоте невозможно, так как велика вероятность возникновения аварийного режима — опрокидывания инвертора (короткое замыкание на выходе сетевого выпрямителя). Сейчас тиристорные инверторы в сварочных источниках питания практически уступили место транзисторным частотным преобразователям. Современные мощные транзисторы имеют более высокие, чем тиристоры, коммутационные свойства и могут обеспечить частоту инвертируемого напряжения и тока до 100 кГц.

Современные источники питания для дуговой сварки с транзисторными инверторами позволяют перейти с аналогового (в тиристорных схемах) на цифровое управление с помощью микропроцессоров. В этом случае многие технологические задачи решаются путем управления формой тока в динамике с высоким быстродействием (скорость срабатывания до 1000 А/с) и получения различного рода токов (постоянный, импульсный средней и высокой частоты, переменного-постоянный) для многих способов сварки.

3.3. Дуговая сварка покрытыми электродами

В настоящее время для сварки на воздухе разработаны и успешно применяются электроды, которые при расплавлении создают надежную газшлаковую защиту сварочной ванны от окружающей атмосферы и обеспечивают высокое качество наплавленного металла.

Такие электроды разработаны для дуговой сварки сталей (в том числе высоколегированных), чугуна и цветных металлов — меди, бронз, латуней, медноникелевых сплавов, никеля, алюминиевых и магниевых сплавов.

Ручная дуговая сварка покрытыми электродами остается одним из самых распространенных методов сварки и широко используется при изготовлении сварных конструкций как в нашей стране, так и за рубежом. Это объясняется универсальностью процесса, простотой и мобильностью применяемого оборудования, возможностью выполнения сварки в различных пространственных положениях и местах, труднодоступных для механизированных способов сварки.

Существенными недостатками ручной дуговой сварки покрытыми электродами являются невысокая производительность процесса и зависимость качества сварного шва от практических навыков сварщика.

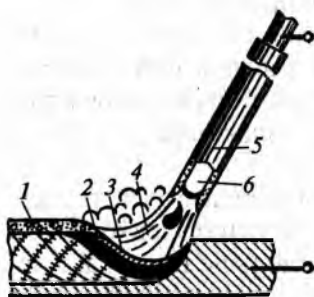


Рис. 3.9. Схема ручной дуговой сварки покрытым электродом:

1 — затвердевший шлак; 2 — сварочная ванна; 3 — слой расплавленного шлака; 4 — дуга; 5 — электродное покрытие; 6 — металлический стержень

Сущность сварки покрытым электродом заключается в следующем. К электроду и свариваемому изделию для возбуждения и поддержания сварочной дуги от источника питания подводится постоянный или переменный ток (рис. 3.9). Дуга расплавляет металлический стержень электрода, его покрытие и

основной металл. Расплавляющееся покрытие образует шлак и газы.

Шлак обволакивает капли металла, образующиеся при плавлении электродной проволоки. В сварочной ванне электродный металл смешивается с расплавленным металлом изделия, а шлак всплывает на поверхность ванны. Расплавленный шлак, покрывая капли электродного металла и поверхность расплавленной сварочной ванны, способствует предохранению их от контакта с воздухом и участвует в металлургической обработке расплавленного металла.

Газы, образующиеся при расплавлении покрытия, оттесняют воздух из реакционной зоны (зоны дуги), что обеспечивает создание лучших условий для защиты нагретого металла.

С целью повышения устойчивости горения сварочной дуги в электродное покрытие вводят соединения, содержащие ионы щелочных металлов. Пары этих соединений снижают сопротивление дугового промежутка за счет увеличения степени его ионизации и делают дуговой разряд устойчивым.

В связи с тем что большая часть теплоты выделяется на торце металлического стержня электрода, на его конце образуется коническая втулка из покрытия. Она способствует направленному движению газового потока, что улучшает защиту сварочной ванны, и удлиняет дугу, увеличивая ее напряжение и мощность, а следовательно, и глубину проплавления.

Кристаллизация металла сварочной ванны по мере удаления дуги приводит к образованию шва, а при смене электродов, при случайных обрывах дуги — к образованию кратера (углубление в шве). Затвердевающий шлак образует на поверхности шва шлаковую корку.

Так как сварочный ток от токопровода в электрододержателе протекает по металлическому стержню электрода, стержень разогревается, и тем больше, чем дольше протекает по стержню сварочный ток и чем больше сила тока. Перед началом сварки металлический стержень имеет температуру окружающего воздуха, а к концу расплавления электрода его температура может значительно повышаться (у стержней из стали до 500—600 °С), вследствие чего скорость расплавления электрода становится намного больше начальной. Кроме того, изменяет-

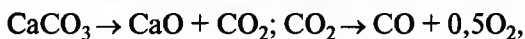
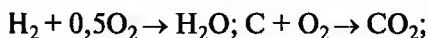
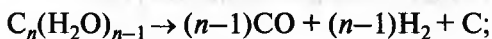
ся глубина проплавления основного металла из-за изменения условий теплоотдачи от дуги к основному металлу через прослойку жидкого металла в сварочной ванне. В результате изменяется соотношение долей электродного и основного металлов, участвующих в образовании сварного шва, а значит, изменяются и состав, и свойства металла шва, выполненного одним электродом. Это одна из причин нестабильности качества соединения.

При сварке покрытыми электродами перемещение вдоль линии стыка и подачу электрода в зону дуги по мере оплавления осуществляют вручную. При этом возникают трудности, связанные с поддержанием постоянства длины дуги. Колебания дугового промежутка отражаются на сварочном токе и напряжении и, как следствие, на размере сварочной ванны и механических характеристиках соединения. Поэтому для повышения стабильности качества соединения используют источники питания с крутопадающими ВАХ.

Электроды, например для сварки стали, представляют собой стержни из сварочной проволоки, на поверхность которой нанесен слой покрытия, предназначенного для повышения устойчивости горения дуги, образования комбинированной газошлаковой защиты, легирования и раскисления металла шва. Для изготовления покрытий применяют различные компоненты:

ионизирующие и стабилизирующие – соединения, содержащие ионы щелочных металлов с низким потенциалом ионизации, например Na_2CO_3 , K_2CO_3 , CaCO_3 , NaF (соответственно поташ, мел, мрамор, полевои шпат);

газообразующие – вещества, разлагающиеся с выделением большого объема газа – мрамор, мел или органические вещества – декстрин, крахмал, целлюлоза, которые при нагревании еще до расплавления металла в результате разложения и окисления дают много газообразных продуктов – CO_2 , CO , H_2 , H_2O :



что обеспечивает защиту от атмосферы воздуха, в частности от азота. Однако эта газовая среда сама является окислительной по отношению к железу и легирующим элементам;

- ◇ шлакообразующие — минералы: полевой шпат $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$, мрамор, мел $CaCO_3$, глинозем Al_2O_3 , флюорит CaF_2 , кварцевый песок SiO_2 , иногда гематит Fe_2O_3 , марганцевая руда, титановый концентрат $TiO_2 \cdot FeO$. При сплавлении эти компоненты образуют шлаки различного состава и основности;
- ◇ раскислители и легирующие компоненты — кремний, марганец, титан и др., используемые в виде порошков сплавов этих элементов с железом (ферросплавы), быстро растворяющихся в жидкой стали. Алюминий в покрытие вводят в виде порошка — пудры.

Некоторые компоненты могут выполнять несколько функций одновременно, например мел, разлагаясь, выделяет много газа CO_2 , оксид кальция идет на образование шлака, а пары кальция имеют низкий потенциал ионизации и стабилизируют дуговой разряд, CO_2 служит газовой защитой.

Для соединения порошков компонентов в замес используют жидкое стекло или полимеры. Покрытие на металлический стержень наносят в специальных прессах или методом окунания в жидкий замес.

Покрытия электродов для магниевых сплавов аналогично покрытиям для сварки алюминиевых сплавов состоят из фтористых и хлористых солей щелочных и щелочноземельных металлов.

Основными параметрами режима ручной дуговой сварки являются диаметр электрода и сила сварочного тока. Остальные параметры подбираются сварщиком в процессе сварки и не регламентируются.

Диаметр электрода устанавливают в зависимости от толщины свариваемых кромок, вида сварного соединения и размеров шва. Для стыковых соединений рекомендуются следующие диаметры электродов в зависимости от толщины свариваемых кромок:

Толщина кромок, мм	менее 2	3–5	6–8	9–12	13–15	16–20	20
Диаметр электрода, мм	менее 2	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8	8–10

По выбранному диаметру электрода устанавливают значение сварочного тока. Обычно для каждой марки электродов значение тока указано на заводской этикетке, но можно также определить его по формулам

$$I_{\text{св}} = (40 - 50)d_{\text{эл}}; I_{\text{св}} = (20 + 6d_{\text{эл}})d_{\text{эл}}; I_{\text{св}} = \pi r_{\text{эл}}^2 j,$$

где $I_{\text{св}}$ — сварочный ток, А; $d_{\text{эл}}$ и $r_{\text{эл}}$ — соответственно диаметр и радиус электрода, мм; j — плотность тока, А/мм².

Полученные значения сварочного тока корректируют, учитывая толщину металла и положение сварного шва. При толщине кромок $(1,3 - 1,6)d_{\text{эл}}$ расчетное значение сварочного тока уменьшают на 10–15 %, а при толщине кромок более $3d_{\text{эл}}$ увеличивают на 10–15 %.

Основное оборудование сварочного поста состоит из источника питания дуги, сварочных проводов, инструментов сварщика и сварочного стола (рис. 3.10).

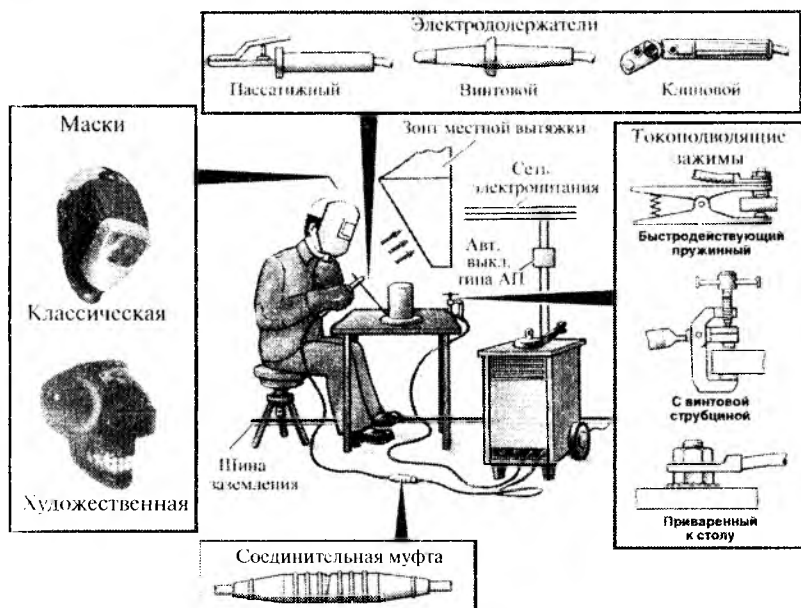


Рис. 3.10. Оборудование сварочного поста для ручной электросварки

Электродуговая сварка закладным электродом (рис. 3.11) — новый способ однопроходной дуговой сварки в узкий зазор для

сварки металла большой толщины. Суть его заключается в следующем. Свариваемые детали без разделки кромок собираются с некоторым определенным зазором, в который вводится изолированный плавящийся электрод с сердечником в виде пластины шириной, равной толщине деталей. В качестве изолирующего материала, наносимого на поверхность пластинчатого сердечника, используется покрытие толщиной 0,8–1,5 мм, состав которого входят оксиды, фториды и карбонаты, а также раскислители. Через продольные каналы сердечника для компенсации дефицита металла в процессе сварки подаются присадочные проволоки или ленты. С обеих сторон свариваемый стык закрыт формирующими накладками. Дуга возбуждается на нижнем конце закладного электрода и, перемещаясь по его торцу, горит в пространстве, ограниченном кромками свариваемых деталей и поверхностями формирующих накладок. При этом пластинчатый электрод, введенный в стык, выполняет функцию устройства, задающего своеобразную «программу» самостоятельного движения дуги.

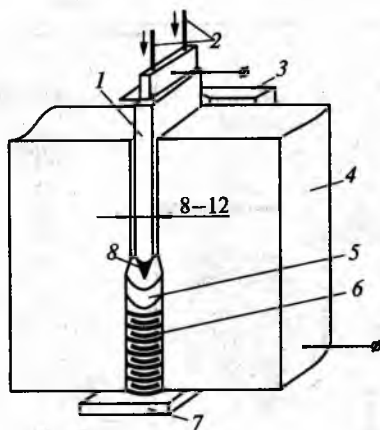


Рис. 3.11. Схема электродуговой сварки закладным электродом:

1 – закладной электрод; 2 – присадочная проволока; 3 – формирующая накладка; 4 – свариваемое изделие; 5 – сварочная ванна; 6 – сварной шов; 7 – подкладка; 8 – дуга

Это позволяет отказаться от перемещения дуги вдоль стыка, которое используется во многих традиционных способах электродуговой сварки. Положительным фактором такого технологического приема является возможность более полного использования теплоты дуги за счет ее горения в закрытом пространстве стыка, сопоставимого по ширине с размерами столба

дуги (рис. 3.12). В результате этого, а также благодаря развитому сечению электрода достигается высокая эффективность его плавления (рис. 3.13).

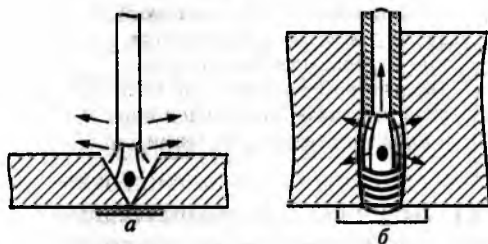


Рис. 3.12. Схема горения дуги в открытом (а) и закрытом (б) пространстве стыка

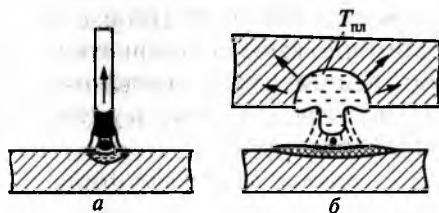


Рис. 3.13. Схемы плавления электрода при использовании проволоочных (а) и пластинчатых (б) электродов ($T_{пл}$ — температура плавления)

Возможность ведения процесса сварки с предварительным заполнением стыка электродным металлом определяется надежностью электрической изоляции электрода от свариваемых деталей в исходном состоянии и в процессе сварки, а также стабильностью горения дуги в узком зазоре. Эти условия обеспечиваются за счет выбора состава изолирующего покрытия, включающего компоненты, образующие при нагреве поток из газа, пара и шлака, который оттесняет дугу от свариваемых кромок (рис. 3.14). Под действием теплоты, создаваемой дугой, происходят нагрев и плавление электрода, присадочного металла и кромок свариваемых деталей, в результате чего образуется сварной шов. Несмотря на беспорядочное перемещение по торцу электрода, дуга обеспечивает устойчивое и равномерное его плавление. Этот эффект можно объяснить на основе принципа Штеенбека, согласно которому дуга в основном горит там, где создаются условия для ее функционирования при минимальном напряжении. Одним из основных факторов, стимулирующих перемещение дуги по торцу электрода, является увеличение расстояния между торцом электрода и сварочной ванной в результате его плавления.

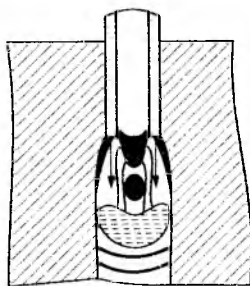


Рис. 3.14. Схема стабилизации и экранирования электрической дуги в узком зазоре при ее горении на торце пластинчатого изолированного электрода за счет действия потока газа, пара или шлака (показано стрелками)

При этом способе сварки за счет использования пластинчатого закладного электрода зазор между кромками составляет 8–12 мм при толщине свариваемых деталей 20–100 мм, благодаря чему обеспечиваются достаточно высокая производительность процесса (суммарный коэффициент расплавления электродного и присадочного металла равен $22 \text{ г}/(\text{А}\cdot\text{ч})$) и умеренное ($25\text{--}50 \text{ кДж}/\text{см}^2$) удельное тепловложение.

3.4. Автоматическая сварка под флюсом

Сварка под флюсом является самым распространенным способом механизированной дуговой сварки плавящимся электродом во многих отраслях промышленности при производстве конструкций из сталей, цветных металлов (алюминия, титана, меди) и их сплавов.

Автоматическую сварку под флюсом целесообразно применять в серийном и массовом производстве для выполнения кольцевых, прямолинейных, стыковых и угловых швов протяженностью 0,8 м и более на металле толщиной 3–100 мм со свободным входом и выходом сварочной головки для начала и конца шва.

Преимуществами автоматической сварки под флюсом являются:

- ♦ высокая производительность;
- ♦ стабильность высокого качества и хорошего внешнего вида сварочных соединений;
- ♦ высокий уровень локальной механизации сварочного процесса и возможность его комплексной автоматизации;

снижение удельного расхода электродного металла и электроэнергии.

Однако автоматической сварке под флюсом присущи следующие недостатки:

- возможность сварки только в нижнем положении;
- необходимость более тщательной, чем при ручной сварке, подготовки кромок и более точной сборки деталей под сварку;
- невозможность сварки стыковых швов на весу — без подкладки или предварительной подварки корня шва.

Сущность процесса дуговой сварки под флюсом заключается в применении непокрытой сварочной проволоки и гранулированного флюса, насыпаемого впереди дуги слоем толщиной 30–50 мм.

Автомат для сварки и схема процесса автоматической дуговой сварки под флюсом приведена на рис. 3.15. Возбуждение и поддержание дугового разряда выполняются автоматически сварочной головкой, которая с помощью механизма подачи 1 непрерывно подает в зону дуги сварочную проволоку 2 по мере ее плавления. Дуга 10 горит между концом электрода и изделием. Перемещение дуги по шву осуществляется самоходной сварочной тележкой (или изделие перемещается относительно неподвижной сварочной головки).

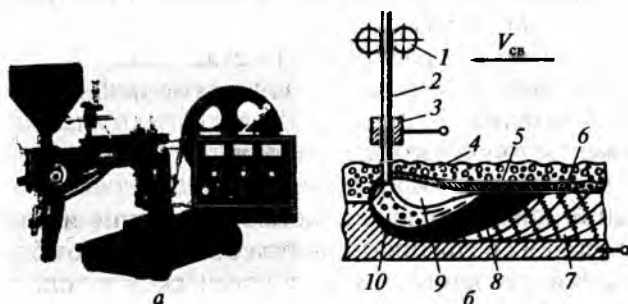


Рис. 3.15. Автомат АДФ-1202 (а) и схема процесса автоматической дуговой сварки под флюсом (б)

Под действием теплоты, выделяемой сварочной дугой, плавятся электродная проволока и металл свариваемого изделия, а также часть флюса 5, примыкающего к дуге. В области горения дуги образуется полость 9 (газовый пузырь), ограниченная в

верхней части оболочкой расплавленного флюса, а в нижней — сварочной ванной 8. Газовый пузырь заполнен парами металла, флюса и газами. Давление газов поддерживает флюсовый свод, формирующийся над сварочной ванной. Дуга несколько отклоняется от вертикального положения в сторону, противоположную направлению сварки. Под влиянием давления дуги жидкий металл 8 оттесняется также в сторону, противоположную направлению сварки. Под электродом образуется кратер с тонким слоем расплавленного металла, а основная масса расплавленного металла занимает пространство от кратера до поверхности шва, располагаясь наклонным слоем. Расплавленный флюс вследствие значительно меньшей плотности всплывает на поверхность расплавленного металла шва и покрывает его плотным слоем. По мере поступательного движения электрода происходит затвердевание металлической и шлаковой ванн с образованием сварного шва 7, покрытого твердой шлаковой коркой 6.

Сварку под флюсом можно осуществлять переменным и постоянным током, одной дугой, двумя дугами, расщепленным электродом и трехфазной дугой.

Расплавленный флюс (шлак), покрывающий металлическую ванну при сварке, выполняет следующие функции:

- ◇ защищает жидкий металл сварочной ванны от непосредственного контакта с воздухом;
- ◇ раскисляет, легирует и рафинирует металл шва;
- ◇ изменяет тепловой режим сварки за счет уменьшения скорости охлаждения металла;
- ◇ обеспечивает устойчивое горение дуги;
- ◇ улучшает условие формирования шва.

Хороший контакт шлака и металла, наличие изолированного от внешней среды пространства обеспечивают благоприятные условия для защиты, металлургической и тепловой обработки сварочной ванны и тем самым способствуют получению швов с высокими механическими свойствами.

По способу изготовления флюсы бывают:

- ◇ плавленные, наиболее распространенные в производстве, и получаемые сплавлением входящих в них компонентов (оксидов и солей металлов) в электрических или пламенных печах с последующей грануляцией, выливанием расплава в воду;

- ♦ керамические, получаемые путем грануляции замеса из тонко измельченных компонентов, соединенных жидким стеклом. В керамических флюсах могут содержаться металлические порошки — раскислители и легирующие компоненты, так как в процессе изготовления они не подвергаются нагреву до высоких температур.

По химическому составу различают окислительные, безокислительные и бескислородные флюсы.

Окислительные флюсы содержат в основном оксиды кремния и марганца. Чтобы придать флюсу необходимые свойства, в него вводят и другие компоненты, например плавиковый шпат, снижающий температуру плавления и вязкость шлака, а также весьма прочные оксиды магния, кальция, алюминия, которые при сварке практически не реагируют с металлом. Эти флюсы обычно используют при сварке низколегированных сталей. Наиболее распространенный флюс данного типа АН-348А содержит: 41—44 % SiO_2 ; 34—38 % MnO ; до 6,5 % CaO ; до 7 % MgO ; до 4,5 % Al_2O_3 ; 4—6 % CaF_2 .

Безокислительные флюсы имеют в качестве основы прочные оксиды металлов и фториды, а оксиды кремния и марганца содержатся в незначительных количествах или вообще отсутствуют. Такие флюсы преимущественно используются для сварки и наплавки высоколегированных сталей. Например, у флюса АН-30 состав: 3 % SiO_2 ; до 0,5 % MnO ; 41,5 % Al_2O_3 ; 18 % CaO ; 14,5 % MgO ; 21 % CaF_2 ; до 1 % FeO .

Бескислородные флюсы состоят в основном из фторидных и хлоридных солей металлов. Их применяют при сварке химически активных металлов. Например, флюс АН-А1 для сварки алюминия и его сплавов состоит из 50 % KCl ; 20 % NaCl ; 30 % Na_3AlF_6 .

Основными параметрами режима автоматической сварки под флюсом являются сварочный ток, род и полярность тока, диаметр электродной проволоки, напряжение дуги, скорость сварки. Влияние тока, напряжения дуги и скорости сварки на форму и размеры шва показаны на рис. 3.16.

С ростом сварочного тока глубина провара увеличивается, а ширина шва почти не изменяется.

С повышением напряжения ширина шва резко увеличивается, а глубина провара и выпуклость (усиление) шва уменьшаются, что следует учитывать при сварке тонкого металла. Несколь-

ко уменьшается. При одном и том же напряжении ширина шва при сварке на постоянном токе (особенно обратной полярности) значительно больше, чем при сварке на переменном токе.

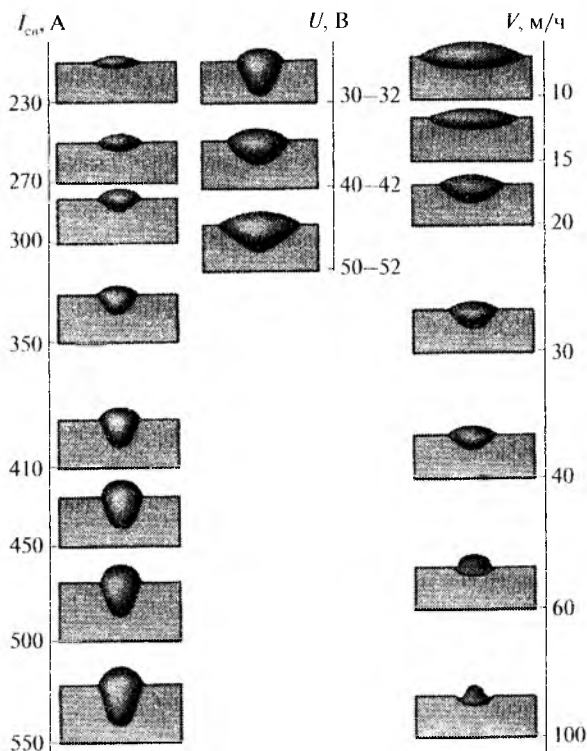


Рис. 3.16. Влияние сварочного тока, напряжения и скорости сварки на форму и размеры сварного шва

С ростом скорости глубина провара сначала возрастает (до 40–50 м/ч), а затем уменьшается. При этом ширина шва уменьшается постоянно. При скорости более 70–80 м/ч основной металл не успевает прогреться и по обеим сторонам шва возможны подрезы.

Увеличение сварочного тока является наиболее эффективным средством повышения производительности процесса сварки. Вследствие хорошей защиты расплавленного металла от воздуха и возможности подвода тока к электроду на близком

расстоянии от его торца (до 70 мм) можно повысить плотность тока до 200–250 А/мм² (при ручной дуговой сварке покрытым электродом плотность тока не превышает 15 А/мм²), не опасаясь перегрева и окисления электродной проволоки. При этом объем сварочной ванны достигает 10–20 см³, в то время как при ручной сварке он составляет 1–2 см².

Ток является тем параметром режима, за счет изменения которого в большинстве случаев сварочной практики изменяют глубину провара основного металла в желаемом направлении.

Процесс сварки. Автоматической сваркой под флюсом выполняют стыковые, тавровые и нахлесточные соединения в нижнем положении шва.

Перед сваркой детали закрепляют на стендах или иных устройствах с помощью различных приспособлений или прихватывают ручной сваркой.

Режим автоматической сварки выбирают в зависимости от толщины свариваемых кромок, формы разделки и свариваемого металла.

Для повышения производительности труда сварку стремятся выполнять однопроходными швами. За один проход без разделки кромок, как правило, выполняют стыковые соединения из стали толщиной 12–15 мм. Для обеспечения полного провара и необходимого усиления шва между кромками стыкуемого соединения предусматривают зазор, зависящий от толщины металла.

Из-за значительного объема расплавленного металла, большой глубины проплавления и некоторого перегрева ванны возможны вытекание металла в зазор и нарушение процесса формирования шва. Чтобы избежать этого, следует использовать стальную или медную подкладку, флюсовую подушку или проварить шов с обратной стороны. Двусторонняя стыковая сварка дает более высококачественный шов, обеспечивая хороший провар даже при некотором смещении свариваемых кромок. Этим способом могут свариваться стальные листы толщиной до 22 мм без разделки кромок. Сварка производится с каждой стороны на режиме, обеспечивающем расплавление основного металла на глубину не менее 0,6 его толщины. Если невозможно выдержать зазор между кромками менее 1 мм, принимают меры по предупреждению подтекания жидкого металла, как при односторонней сварке.

3.5. Дуговая сварка в среде инертных газов

Сварка в инертных газах производится неплавящимся вольфрамовым электродом или плавящимся электродом, по химическому составу близким к составу свариваемого металла; она осуществляется вручную, полуавтоматически и автоматически.

Этот вид сварки удобен для выполнения сварных соединений в любых пространственных положениях, легко поддается механизации, позволяет наблюдать за сварочной ванной в процессе работы, характеризуется довольно высокой производительностью, достигающей при ручной сварке 40–50 м/ч, а при автоматической – 200 м/ч.

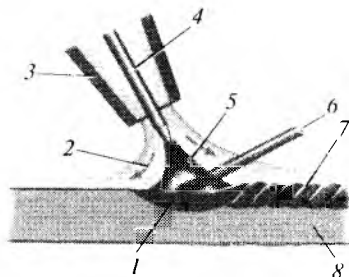


Рис. 3.17. Схема процесса сварки:
1 – сварочная ванна; 2 – поток газа;
3 – сопло горелки; 4 – вольфрамовый электрод; 5 – электрическая дуга; 6 – присадка; 7 – сварной шов; 8 – основной металл

Ручная дуговая сварка в среде инертного газа происходит по схеме на рис. 3.17. При этом кромки свариваемого изделия и присадочного металла расплавляются дугой, горящей между неплавящимся электродом и изделием. Дуга, сварочная ванна, торец присадочной проволоки и кристаллизующийся шов защищены от воздуха инертным газом, который подается горелкой в зону сварки.

Принципиальная схема поста, рабочее место и горелка для ручной дуговой сварки в среде инертных газов показаны на рис. 3.18–3.20. В состав оборудования для ручной сварки постоянным током входят: источник сварочного тока, сварочная горелка, устройство возбуждения сварочной дуги, аппаратура управления сварочным циклом и газовой защитой. Перемещение сварочной горелки и подача присадочной проволоки в зону горения дуги производятся вручную.

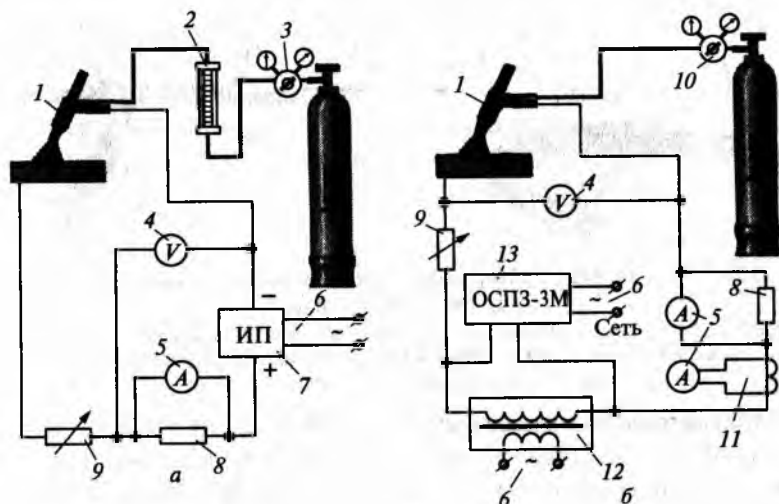


Рис. 3.18. Схемы постов для ручной дуговой сварки в среде инертных газов на постоянном (а) и переменном (б) токе:

1 – горелка; 2 – ротаметр; 3 – редуктор; 4 – вольтметр; 5 – амперметр; 6 – сеть; 7 – сварочный источник постоянного тока; 8 – шунт; 9 – балластный реостат; 10 – редуктор-расходомер (регулятор); 11 – трансформатор тока; 12 – сварочный трансформатор; 13 – осциллятор

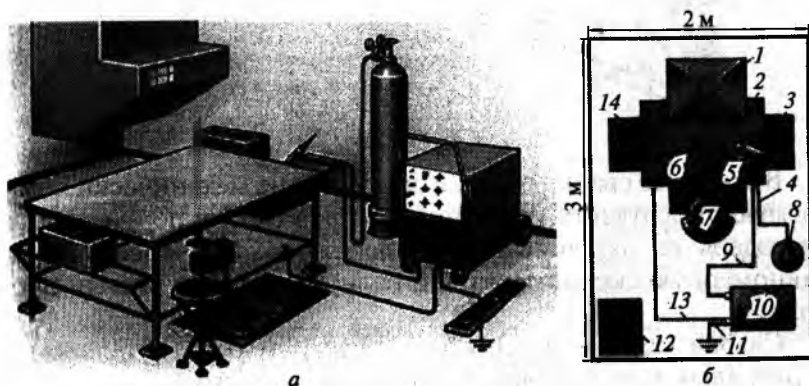


Рис. 3.19. Сварочный пост для ручной дуговой сварки в среде инертных газов (а) и его планировка (б):

1 – вентиляция; 2 – рабочий стол; 3 – ящик для деталей; 4 – газовый рукав; 5 – горелка; 6 – диэлектрический коврик; 7 – стул; 8 – газовый баллон; 9 – прямой провод; 10 – источник питания дуги; 11 – заземление; 12 – обратный провод; 13 – ящик для отходов; 14 – ящик для электродов

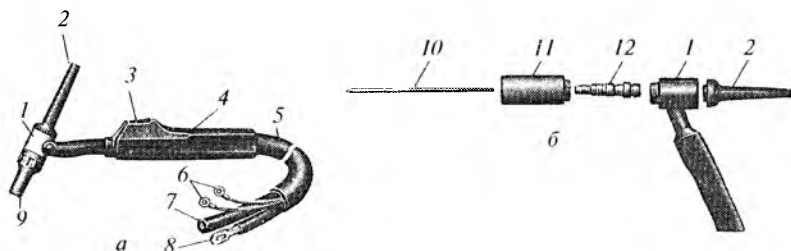


Рис. 3.20. Ручная горелка для сварки неплавящимся вольфрамовым электродом (а) и ее составные части (б):

1 — корпус; 2 — тыльный колпачок; 3 — кнопка управления; 4 — рукоятка; 5 — резиновый рукав; 6 — провода управления; 7 — газовый рукав; 8 — токоподводящий провод; 9 — сопло; 10 — W-электрод; 11 — сопло; 12 — пистолет

Полуавтоматическая сварка перспективна для изделий из легированных нержавеющей сталей с криволинейными и короткими швами, особенно в монтажных условиях. Принципиальная схема держателя полуавтомата приведена на рис. 3.21.

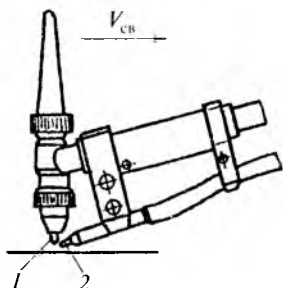


Рис. 3.21. Схема процесса полуавтоматической сварки:

1 — вольфрамовый электрод; 2 — присадочная проволока

В процессе сварки горелка опирается на механически подаваемую от редуктора присадочную проволоку и перемещается благодаря ее отталкивающему действию. Это обеспечивает равномерную скорость сварки, равную скорости подачи проволоки.

Сварка может выполняться в нижнем горизонтальном и вертикальном положениях стыковых соединений.

Автоматическая сварка может выполняться без присадочного материала и с присадочным материалом.

Односторонняя сварка неплавящимся электродом встык без разделки кромок, без гарантированного зазора, без присадки, а также без применения приемов увеличения глубины про-

плавления (активирующих флюсов) обеспечивает полный провар при толщине заготовки не более 5 мм.

Процесс автоматической сварки без присадочного материала чрезвычайно прост и поэтому широко распространен. Образование сварочного шва без присадки происходит за счет расплавления стыкуемых кромок. Свариваемые заготовки собираются без зазора.

Процесс автоматической сварки с присадочной проволокой широко используется для соединения заготовок толщиной более 1,5 мм. Присадочная проволока подается с заданной скоростью, которая регулируется в весьма широких пределах.

В состав оборудования для автоматической сварки входят: сварочная головка, устройство для перемещения сварочной головки или изделия, аппаратура управления механизмами автомата (рис. 3.22, а).

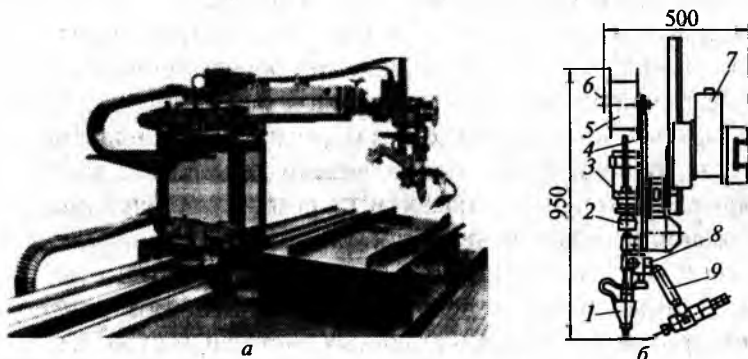


Рис. 3.22. Общий вид аппарата АД-238 для автоматической аргонодуговой сварки с присадкой (а) и схема сварочной головки Т451.01.01.000 (б):

1 — горелка; 2 — механизм подачи; 3 — привод; 4 — подвеска; 5 — кассета; 6 — тормозное устройство; 7 — суппорт двухкоординатный; 8 — корректор; 9 — подвеска

Простейшая сварочная головка включает в себя: сварочную горелку, устройства для установочных перемещений горелки — настройки на шов, установки длины дуги (рис. 3.22, б). Обычно сварочная головка содержит и другие функциональные узлы — механизм подачи присадочной проволоки, механизмы установочных перемещений мундштука для подвода присадки к сварочной ванне, устройство для колебания горелки поперек стыка (колебатель); автоматический регулятор напряжения дуги и т.п.

Головка может быть самоходной, или устанавливаться на самоходную тележку-трактор (автомат тракторного типа), или укрепляться неподвижно, если сварочное движение осуществляется изделием (подвесная головка). На самоходных головках предусмотрен привод перемещения вдоль линии сварки. Автоматы могут быть снабжены системами слежения за линией стыка изделия.

В качестве источников сварочного тока при сварке в среде инертных газов используют выпрямители, преобразователи, трансформаторы и инверторы.

В некоторых задачах, если место сварки тонких листов доступно только с одной стороны, используют одностороннюю точечную сварку, например вольфрамовым электродом. При этом верхний лист проплавляется дугой и происходит сплавление верхнего и нижнего листов. Такой процесс не оставляет вмятины на поверхности, как при традиционной контактной сварке, или выпуклые точки, как при обычной сварке. Точечную сварку неплавящимся электродом осуществляют и постоянным, и пульсирующим током. Применяют стандартные инверторы, оснащенные специальными горелками. Новинкой являются специальные насадки на сопло горелки (рис. 3.23), позволяющие поддерживать постоянное расстояние между горелкой и местом сварки и соответственно постоянную длину дуги. Данный процесс рекомендуется применять для постановки прихваток и сварки стальных листов и листов из алюминиевых сплавов толщиной 2,5 мм.

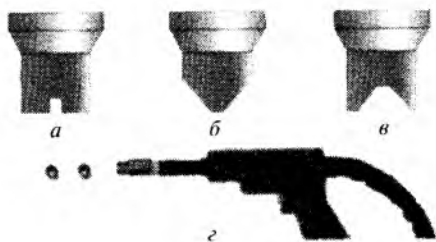


Рис. 3.23. Специальные насадки на сопло горелки SpotArc:

а — для стыкового шва; б — для углового внутреннего шва; в — для углового наружного шва; г — внешний вид горелки

Качество защиты нагретого и расплавленного металла при сварке зависит не только от вида защитного газа, но и от способа защиты.

В производстве сварных конструкций находят применение три основных способа защиты свариваемого узла, или зоны сварки, от взаимодействия с воздухом — общая защита, местная защита и струйная защита.

При *общей защите* свариваемый узел полностью помещают в камеру, которая вакуумируется до разрежения 10^{-2} Па (для удаления воздуха) и заполняется защитным газом (рис. 3.24, *а*). При работе сварщик находится вне камеры. Сварку выполняют вручную, используя рукава-перчатки (рис. 3.24, *б, в*), соединенные с корпусом камеры, или автоматически с дистанционным управлением. Применение камер с общей защитой всего узла обеспечивает наиболее надежную защиту нагретого и расплавленного металла от взаимодействия с воздухом. Основные недостатки этих камер — ограниченный объем и относительная сложность эксплуатации.



Рис. 3.24. Общий вид камеры с контролируемой атмосферой (*а*), схема выполнения ручной аргонодуговой сварки в камере с контролируемой атмосферой (*б*) и камера с прозрачным корпусом для ручной аргонодуговой сварки (*в*)

Для изготовления крупногабаритных конструкций находят применение обитаемые камеры с инертной атмосферой. В этом случае сварщик в специальном скафандре находится внутри камеры.

В опытном или единичном производстве применение камер с общей защитой, тем более обитаемых, нецелесообразно по экономическим соображениям. В таких случаях для защиты металла шва и околошовной зоны применяют *местные защитные камеры*, которые устанавливают на свариваемые узлы, обеспечивая герметичность разъемов при перемещении заготовок (рис. 3.25).

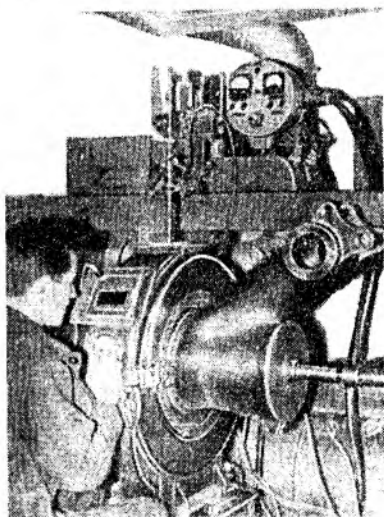


Рис. 3.25. Местная защитная камера для аргонодуговой сварки кольцевых швов

При *струйной защите* защитные газы подают в зону сварки через сопло горелки. Если сопло горелки не обеспечивает надежной защиты, то его дополняют специальной насадкой (рис. 3.26).

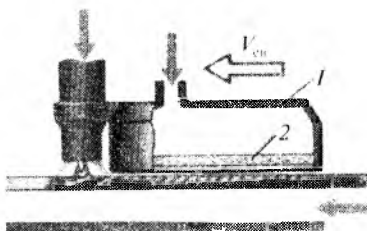


Рис. 3.26. Подача защитного газа в зону сварки через сопло и насадку 1 (2 — газовая линза, обеспечивающая ламинарность потока газа)

При сварке стыковых швов со струйной защитой воздух может поступать к переплавленному дугой металлу через зазор между свариваемыми деталями, что вызовет окисление металла шва, может привести к образованию пор в шве. Для предупреждения этих дефектов применяют обдувку защитным газом обратной стороны шва, сварку ведут на плотно прилегающих со стороны шва подкладках, в которые подается защитный газ с регулируемым избыточным давлением (рис. 3.27).

Технологические характеристики процесса сварки вольфрамовым электродом зависят главным образом от рода, поляр-

ности, силы сварочного тока, длины дуги, размеров и формы торца вольфрамового электрода.

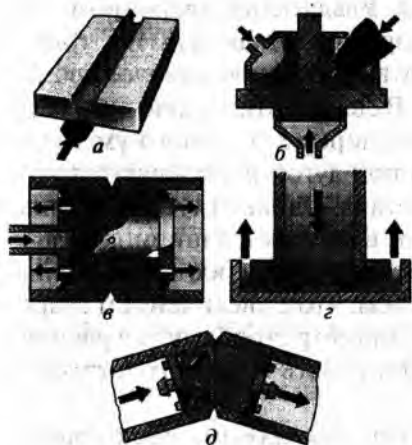


Рис. 3.27. Газовая защита нагретых участков:
а — корня шва; б — тавровых и угловых соединений;
в — корня шва трубопровода; г — при приварке фланца; д — при сварке секционных отводов; стрелками показан поток защитного газа

Сварка постоянным током прямой полярности характеризуется максимальной проплавляющей способностью. В диапазоне токов до 600 А доля тепловой мощности, вводимой в изделие, составляет 60–80 %, потери на нагрев вольфрамового электрода — около 5 %, а лучевые потери от столба дуги — 5–35 %.

При *сварке постоянным током обратной полярности* потери на нагрев неплавящегося электрода — анода — составляют около 50 % общей мощности дуги. Поэтому энергетически сварка током обратной полярности невыгодна. В этом случае концентрация нагрева ниже, швы имеют меньшую глубину и большую ширину проплавления, чем при сварке током прямой полярности или переменным током. Преимуществом сварки дугой обратной полярности является эффективное разрушение оксидных пленок с обеспечением высокой чистоты поверхности сварочной ванны за счет развития катодного распыления. Процесс характеризуется хорошим сплавлением основного и присадочного металлов даже при нетщательной подготовке поверхности изделий под сварку.

Сварка переменным током наиболее распространена при изготовлении конструкций из алюминиевых и магниевых сплавов. Очистка поверхностей от оксидов происходит в полу-

периоды обратной полярности. В диапазоне сварочных токов 250—600 А существенную роль в проплавлении шва играет механическое воздействие дуги. Увеличение сварочного тока от 300 до 600 А при сварке, например, стали X18H9T толщиной 16 мм приводит к линейному возрастанию силового воздействия дуги с $6 \cdot 10^{-2}$ до $15 \cdot 10^{-2}$ Н. В связи с этим столб дуги углубляется в расплавленный металл, в результате чего уменьшается прослойка жидкого металла под дугой и улучшаются условия теплопередачи в основной металл. Однако глубина проплавления увеличивается на 50 % (от 6 до 9 мм), а ширина возрастает на 80 % (от 10 до 18 мм). Более медленный рост проплавляющего действия дуги обусловлен тем, что с увеличением сварочного тока одновременно растет диаметр столба дуги и расширяется пятно нагрева, тогда как плотность теплового потока меняется незначительно.

Способ сварки неплавящимся электродом с дискретно-периодической подачей по заданной программе двух защитных газов (аргона и гелия) в зону сварочной дуги разработали российские ученые. Вследствие разности потенциалов ионизации аргона и гелия и периодического изменения состава защитной газовой атмосферы изменяются температура столба дуги и активных пятен, электрические и газодинамические параметры сварочной дуги, а также гидродинамические характеристики процессов, протекающих в сварочной ванне.

Как показали исследования, сила сварочного тока и напряжение дуги периодически изменяются, а именно: при поступлении аргона в дуговой промежуток увеличивается сила тока и одновременно снижается напряжение дуги, а когда поступает гелий, наоборот, при снижении силы сварочного тока напряжение увеличивается.

Для получения требуемой глубины и площади проплавления погонная энергия может быть снижена не менее чем на 20 %. Это преимущество обусловлено изменением температуры сварочной ванны при изменении состава защитной среды. При поступлении порции аргона расплавленный металл сварочной ванны имеет более низкую температуру, чем при поступлении порции гелия. В результате этого температура жидкого металла сварочной ванны колеблется с частотой изменения за-

щитной среды. Чрезмерной сосредоточенности дугового разряда в активных пятнах не происходит из-за сравнительно малого изменения энергетических параметров режима сварки.

Периодические изменения состава защитного газа и параметров режима сварки при изменении потенциала ионизации дугового промежутка приводят к периодическому изменению сил поверхностного натяжения расплавленного металла, газодинамического давления сварочной дуги, температуры жидкого металла сварочной ванны, а также скорости протекания диффузионных процессов. Это в свою очередь обеспечивает значительное уменьшение испарения легирующих элементов сплавов и химической неоднородности металла шва и зоны сплавления, снижение вредных аэрозолей. Такие преимущества позволяют получить мелкозернистую структуру шва, улучшить форму шва и тем самым снизить уровень остаточных сварочных напряжений, уменьшить деформацию сварных конструкций.

Способ с дискретно-попеременной подачей аргона и гелия позволяет уменьшить силы поверхностного натяжения расплавленного металла, увеличить его подвижность, снизить вероятность образования пор, значительно повысить плотность металла швов. При этом производительность процесса сварки, а также прочность и пластичность сварных соединений выше на 30–50 %, чем при использовании традиционных технологий сварки. Кроме того, улучшаются санитарно-гигиенические условия работы сварщиков и обслуживающего персонала благодаря значительному сокращению выделений вредных аэрозолей и озона, а при сварке алюминиевых сплавов, легированных литием и скандием, не требуется применять специальные меры защиты для обеспечения безопасной работы.

Сварка плавящимся электродом в инертном газе начиная с 1960-х гг. широко используется в промышленном производстве, непрерывно происходит ее усовершенствование. Последние достижения в основном связаны с разработкой источников питания, способов подачи проволоки и использованием новых присадочных материалов, а также с повышением скорости наплавки и соответственно производительности и скорости сварки путем расширения сферы действия уже известных процессов и разработки новых.

Современные электроника и компьютерное управление привели к возможности усовершенствования систем подачи проволоки, использования цифрового управления мощностью с получением высоких коэффициентов соотношения мощности и массы. Цифровые контроллеры позволяют реализовывать различные характеристики источника питания, обеспечивающие комплексную стратегию управления, намного упрощают связь с внешними компьютерами. Вследствие этого современные источники питания обеспечивают выполнение многочисленных функций – регулировку характеристик процесса, уточнение и документирование параметров и качества сварки.

С помощью этих устройств можно осуществлять различные сварочные процессы – от хорошо известного способа сварки короткой дугой до таких высокопроизводительных способов, как сварка вращающейся дугой и дуговая сварка со струйным переносом металла.

Параметры сварки одной проволокой с использованием упомянутых видов дуги достигли такого уровня, который, вероятно, нельзя существенно повысить за счет дальнейшего совершенствования источников питания, присадочных материалов или защитных газов. В литературе упоминаются сварка короткой дугой с высокой скоростью наплавки (до 2 м/мин), а также сварка вращающейся дугой со скоростью наплавки до 14 кг/ч; дальнейшему повышению скорости наплавки препятствует, в частности, нестабильность вращения дуги.

В технологии сварки двумя проволоками используется комбинация двух проволоочных электродов в одном общем газовом сопле. Использование двух проволок оказывает значительное влияние на форму сварочной ванны. Расположение электродов один позади другого удлиняет сварочную ванну в направлении линии сварки. При этом электродная проволока в передней части ванны обеспечивает достаточный уровень проплавления, а проволока, находящаяся в хвостовой части ванны, определяет форму наплавленного валика. Удлиненная форма сварочной ванны обеспечивает более эффективную дегазацию, что снижает склонность к образованию пористости, особенно при сварке алюминия. При повороте электродов таким образом, чтобы они располагались один за другим, созда-

ются благоприятные условия сварки по зазору при низкой силе тока, что, однако, влияет на скорость сварки; так, при повороте электродов приблизительно на 20° требуется снижение скорости сварки на 25–30 %.

Существуют две разновидности способа сварки двумя проволоками: спаренными электродами, когда используется общий мундштук; последовательными дугами, когда требуются отдельные мундштуки с электрической изоляцией для каждой из проволок (рис. 3.28).

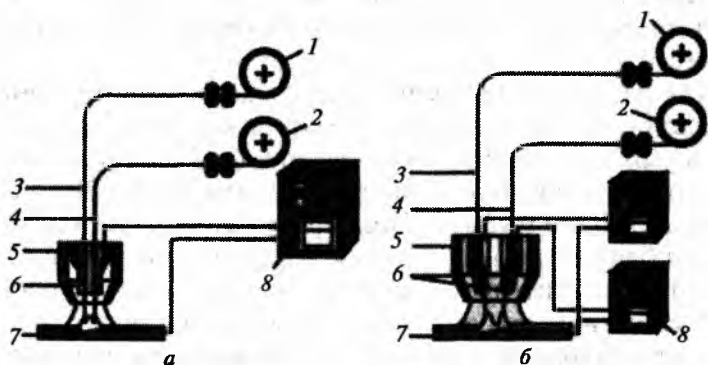


Рис. 3.28. Схема сварки двумя проволоками:

а — спаренными электродами; *б* — последовательными дугами; 1, 2 — механизм подачи проволоки; 3, 4 — соответственно первая и вторая проволока; 5 — газовое сопло; 6 — мундштук; 7 — обрабатываемая деталь; 8 — источник питания

Технология сварки спаренными электродами предполагает использование одного общего мундштука, подсоединенного к одному источнику питания или двум спаренным (рис. 3.28, *а*). При этом на обе электродные проволоки подается одинаковое напряжение. Поскольку два равнонаправленных токоподводящих проводника притягиваются под действием магнитных сил, отделяющиеся при плавлении электродов капли попадают в общую сварочную ванну на расстоянии 4–7 мм друг от друга. При небольшом расстоянии между двумя электродами могут образовываться капельные переемычки, обуславливающие нестабильность процесса. При значительном расстоянии между проволоками образуются две отдельные сварочные ванны, а из-за сильного эффекта дутья дуги возникают брызги.

Основной недостаток этого варианта сварки связан с невозможностью выбрать скорость подачи проволоки и ее диаметр индивидуально для каждого электрода. Более того, при коротком замыкании одной дуги гаснет другая, что создает нестабильность сварочного процесса.

Эти недостатки отсутствуют у горелки с электрически изолированными мундштуками и синхронизированными источниками питания с независимым управлением (рис. 3.28, б). Этот способ можно применять при сварке короткой дугой, используя проволоку различных диаметров и различную скорость ее подачи, что обеспечивает стабильность сварочного процесса.

Как известно, для уменьшения массы конструкций применяют более тонкие листовые материалы, что рождает сложность выполнения сварки по зазору. При сварке на токе обратной полярности количество теплоты, подводимой к основному материалу, и глубина проплавления снижаются, что создает благоприятные условия для сварки по зазору. Однако при этом значительно ухудшается стабильность процесса. Чтобы достичь стабильности сварочного процесса с регулируемой глубиной проплавления и осуществлять сварку по зазору для соединения тонколистовых материалов в промышленных условиях, при сварке на переменном токе используются источники питания, в которых комбинируется стандартный импульсный процесс с регулируемыми импульсами при обратной полярности.

Сварка ленточным электродом — новый способ процесса сварки плавящимся электродом в инертном газе, использующий специальные механизмы подачи проволоки и контактные наконечники, в которых применяют узкие ленточные электроды сечением приблизительно $4,0 \times 0,5$ мм. При такой геометрии электроды имеют большую площадь поверхности, чем электродная проволока круглого сечения с сопоставимой площадью поперечного сечения, поэтому для плавления материала требуются меньшие энергия и соответственно сварочный ток. Разработаны два способа использования этого эффекта: 1) увеличение скорости подачи проволоки с целью повышения скорости наплавки; 2) снижение погонной энергии сварки.

В этом случае за счет прямоугольного сечения электрода основание дуги образует эллипс. Изменив его расположение, можно влиять на глубину проплавления. При расположении электрода в направлении линии сварки увеличивается глубина проплавления, что способствует выполнению угловых швов на более толстых листовых материалах; при расположении электрода поперек шва происходит неглубокое проплавление и создаются благоприятные условия для сварки по зазору.

3.6. Дуговая сварка в углекислом газе

Сущность сварки в среде CO_2 состоит в том, что дуга горит в среде защитного газа, оттесняющего воздух от зоны сварки и защищающего расплавленный металл от кислорода и азота воздуха. Полуавтоматическая, меньше — автоматическая сварка в углекислом газе находит широкое применение в производстве сварных конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей.

Полуавтоматическую сварку в углекислом газе применяют в единичном, мелкосерийном и реже — в серийном производстве для выполнения непротяженных швов изделий небольшой толщины.

Преимуществами этого способа сварки являются:

- ♦ повышение производительности по сравнению с ручной сваркой в 1,2—1,5 раза;
- ♦ возможность сварки в любом пространственном положении и стыковых швов «на весу»;
- ♦ высокие маневренность и мобильность (по сравнению с автоматической сваркой);
- ♦ возможность визуального контроля за направлением дуги по стыку.

Однако при этом происходит сильное разбрызгивание металла при сварке на токах 200—400 А и возникает необходимость удаления брызг с поверхности изделия; затруднено использование на открытом воздухе (на ветру) из-за сдувания защитного газа; внешний (товарный) вид шва хуже, чем при сварке под флюсом.

Анализ процессов, протекающих в газовой фазе реакционной зоны, дает основание утверждать, что углекислый газ является сильным окислителем и при сварке в CO_2 формируется окислительная атмосфера, которая окисляет металл и легирующие элементы. Растворяющийся в сплаве кислород может реагировать с примесями металла, образуя шлаки и газы. В хвостовой части сварочной ванны шлак всплывает на поверхность металла, а образующиеся газообразные продукты могут стать причиной появления пор в металле шва.

Для связывания кислорода, растворенного в металле, применяют электродные проволоки, содержащие раскислители, которые предохраняют от окисления легирующие добавки и подавляют процесс выгорания углерода свариваемого металла.

Поэтому металл, наплавленный при сварке в углекислом газе, чище по шлаковым включениям и его пластические свойства несколько выше, чем при сварке под слоем флюса.

Режимы и техника сварки. К основным параметрам режима сварки относятся полярность тока (как правило, обратная), диаметр электродной проволоки, сила тока, напряжение дуги, скорость сварки, вылет электрода (примерно равный расстоянию от торца горелки до свариваемого металла) и расход защитного газа.

Переменный и постоянный (прямой полярности) токи не применяются из-за недостаточной устойчивости процесса и неудовлетворительного качества и формы шва. При токе прямой полярности процесс сварки сопровождается большим разбрызгиванием и крупнокапельным переносом электродного металла.

При сварке в углекислом газе обычно применяют электродную проволоку малых диаметров (0,8—2,0 мм), ток высокой плотности и соответственно большую скорость плавления электрода, например на форсированных режимах тонкими проволоками наиболее целесообразной является плотность тока в электроде 250—450 А/мм². Увеличение диаметра электродной проволоки (при прочих равных условиях) сопровождается существенным уменьшением коэффициента наплавки, некоторым увеличением ширины шва и уменьшением глубины проплавления основного металла.

Диаметр электродной проволоки d_3 выбирается в зависимости от толщины свариваемых заготовок δ :

δ , мм	0,5–1,0	1,0–2,0	2,0–4,0	5,0–8,0	8,0–1,2	12–18
d_3 , мм	0,5–0,8	0,8–1,0	1,0–1,2	1,6–2,0	2,0	2,0–2,5

Большое влияние на процесс сварки оказывает сварочный ток. Повышение силы тока вызывает увеличение глубины проплавления, и количество наплавленного металла возрастает медленнее, чем проплавление, поэтому существенно уменьшается доля электродного металла в металле шва, что значительно увеличивает вероятность появления горячих трещин в металле швов, выполненных на сталях с повышенным содержанием углерода. Ширина шва с ростом силы тока сначала увеличивается, затем несколько уменьшается. На оптимальных режимах сварки получается максимальная ширина шва.

С увеличением напряжения дуги глубина проплавления основного металла уменьшается, а ширина шва и количество наплавленного и количество проплавленного металла немного увеличиваются. Повышение напряжения дуги сопровождается усилением разбрызгивания жидкого металла и ухудшением газовой защиты зоны сварки, что приводит к появлению пор и повышению содержания газов в металле шва.

С увеличением скорости сварки уменьшаются размеры швов и количество наплавленного и проплавленного металлов.

Рабочий пост для сварки плавящимся электродом в среде углекислого газа должен быть снабжен: источником постоянного тока, полуавтоматом, баллоном с газом, редуктором, ротаметром, амперметром и вольтметром (рис. 3.29).

Для сварки наиболее удобна жидкая углекислота, выпускаемая по ГОСТ 8050–85 с содержанием CO_2 не менее 99,5 %. В стандартный баллон заливают 25 л жидкой углекислоты, которая при испарении дает 12,5 м³ газа.

Непрерывный отбор газообразной CO_2 из баллона сопровождается резким уменьшением ее температуры и давления вследствие поглощения скрытой теплоты испарения при переходе CO_2 из жидкой фазы в газообразную. При отборе газа с расходом свыше 20 л/мин CO_2 превращается в сухой лед. Для

предохранения редуктора от замерзания используют подогреватель газа.

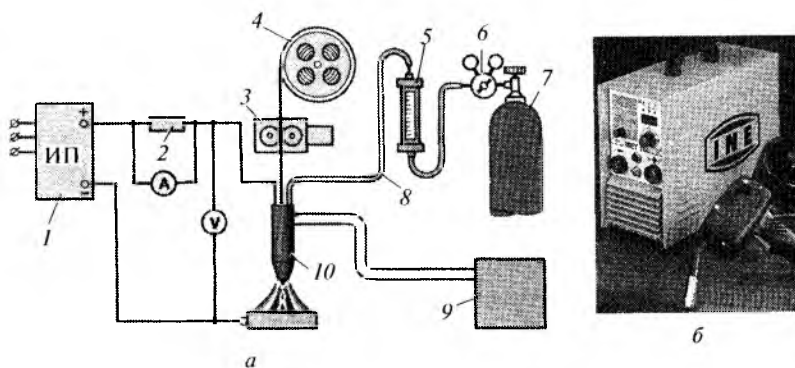


Рис. 3.29. Схема поста (а) и полуавтомат (б) для сварки плавящимся электродом в углекислом газе:

1 — источник питания дуги; 2 — шунт; 3 — механизм подачи проволоки; 4 — кассета с проволокой; 5 — ротаметр; 6 — редуктор; 7 — баллон; 8 — рукав (шланг); 9 — система циркуляционного охлаждения; 10 — горелка

В полуавтоматах для дуговой сварки осуществляется механизированная подача сварочной проволоки.

Основными элементами полуавтоматов являются: держатель, гибкие шланги, механизм подачи сварочной проволоки, кассета со сварочной проволокой и шкаф управления. Конструктивные особенности как самих полуавтоматов, так и их отдельных элементов зависят в основном от назначения (специализации) полуавтоматов.

Наиболее важный элемент полуавтомата — механизм подачи проволоки. По способу подачи проволоки различают полуавтоматы трех типов — толкающего, тянущего и толкающе-тянущего (рис. 3.30). Наиболее распространены полуавтоматы толкающего типа, в которых электродная проволока подается путем проталкивания ее через гибкий шланг (направляющий канал) к держателю; устойчивая подача проволоки возможна только при достаточной ее жесткости (мягкая и тонкая проволока сминается). В полуавтоматах тянущего типа механизм размещен на держателе и проволока протаскивается через гибкий шланг; тянущая система обеспечивает устойчивую подачу

мягкой и тонкой проволоки. В полуавтоматах с двумя синхронно работающими механизмами подачи (рис. 3.30, *в*) один из них толкает, а другой протаскивает сварочную проволоку.

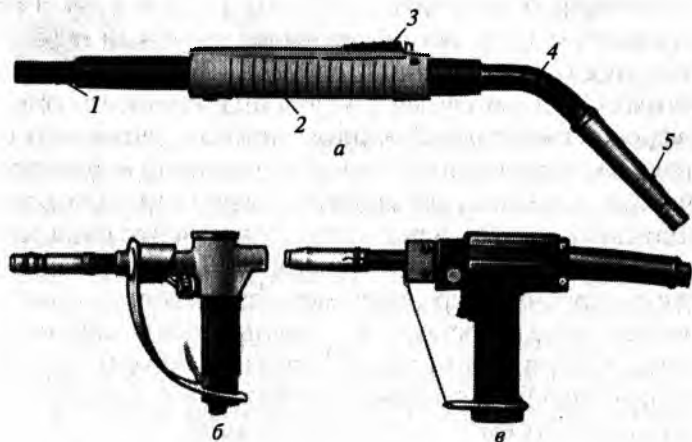


Рис. 3.30. Сварочные горелки для полуавтоматической сварки:

а — для механизмов подачи толкающего типа; *б* — с встроенным в рукоятку механизмом тянущего типа; *в* — с комбинированным механизмом подачи толкающе-тянущего типа; 1 — шланг; 2 — рукоятка; 3 — кнопка управления; 4 — направляющая; 5 — сопло

Для сварки выпускают полуавтоматы, рассчитанные на номинальные токи 150–600 А для проволок диаметром 0,8–3,5 мм со скоростями подачи 1,0–0,17 м/мин. Полуавтоматы комплектуются источниками питания — выпрямителями с жесткой характеристикой.

В последнее время в сварочном производстве все более широкое применение находят технологии механизированной сварки, которые обеспечивают высокое качество сварных соединений и значительную производительность при трудозатратах, меньших, чем при других видах сварки. Современный пост для механизированной сварки представляет собой высокоинтеллектуальный комплекс, оснащенный инверторным источником питания с набором управляющих и контролирующих программ, дополнительных опций для подключения компьютерной техники, что позволяет максимально упростить процесс настройки и управления, а сварщику полностью сосредоточиться на самом процессе сварки.

Новейшее оборудование для полуавтоматической сварки, разработанное компанией EWM (Германия), позволяет вести сварку с малым разбрызгиванием благодаря полностью цифровым инверторным сварочным аппаратам с функцией ForceArc (форсированная дуга), обеспечивающей струйный перенос металла без коротких замыканий (рис. 3.31–3.33). За счет высокоскоростных обратных связей и малой индуктивности современной цифровой инверторной техники можно ограничивать размеры капель расплавленного металла и мгновенно корректировать сварочный ток, не позволяя процессу сварки переходить в режим «коротких замыканий». В результате существенно снижается вероятность образования брызг при сварке. Длина дуги при обычной дуге со струйным переносом металла относительно велика, с чем связаны такие недостатки, как уменьшение устойчивости дуги, прежде всего в узких стыках. В режиме ForceArc длина дуги значительно меньше и появляется возможность выполнять сварку на увеличенных вылетах и в узкую разделку.

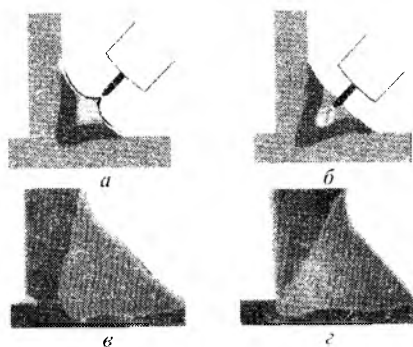


Рис. 3.31. Схема сварки угловых соединений и макрошлифы сварных соединений.
а, в — стандартная дуга со струйным переносом; б, г — дуга EWM-ForceArc

Форсированная дуга имеет ряд преимуществ перед обычной дугой со струйным переносом металла:

- ♦ глубокий провар благодаря высокому давлению плазмы в дуге;
- ♦ простота управления при сварке, обусловленная стабильностью дуги;
- ♦ отсутствие подрезов за счет короткой дуги;
- ♦ экономичность вследствие высокой скорости сварки и возможного уменьшения числа проходов;
- ♦ лучшее качество металла шва из-за уменьшения зоны нагрева и снижения деформации.

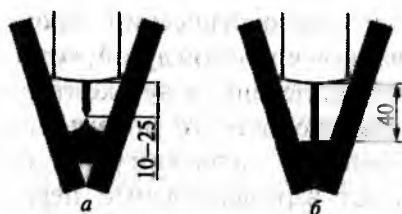


Рис. 3.32. Схема сварки в узкую разделку:

а — стандартная дуга со струйным переносом; *б* — дуга EWM-ForceArc

В настоящее время все полуавтоматы серии Phoenix (компании EWM) наряду со стандартными настройками обладают функцией ForceArc. Новые источники питания сварочной дуги рекомендуется использовать прежде всего в машино-, автомобиле- и судостроении, при изготовлении мостовых и балочных конструкций, резервуаров и контейнеров, а также оборудования для нефтедобывающей промышленности. Сегодня данный процесс применяется при сварке углеродистых, легированных и высоколегированных сталей, а также алюминия и алюминиевых сплавов толщиной 5 мм и более. В качестве защиты расплавленного металла используют смеси с высоким содержанием аргона (82 %).

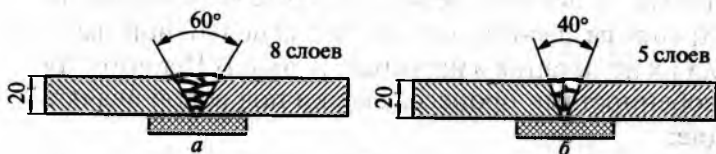


Рис. 3.33. Схема сварки стыковых соединений:

а — стандартная дуга со струйным переносом; *б* — дуга EWM-ForceArc

Технология сварки современных конструкционных материалов предъявляет к сварочному оборудованию требования, которые крайне сложно реализовать при использовании существующих оборудования и технологий. Так, для сварки легких сплавов (на основе алюминия и магния) и сталей со специальными покрытиями (оцинкованный металл), применяемых в автомобилестроении и позволяющих снизить массу автомобиля, увеличить коррозионную стойкость конструкции, требуются новое оборудование, обеспечивающее равнопрочное сварное соединение без выгорания защитного покрытия, т.е. с минимальным тепловым вложением.

Этим требованиям отвечает технологический процесс ColdArc – сварка модифицированной короткой дугой, которая характеризуется тем, что капельный перенос в ней контролируется с помощью нового высокоскоростного инверторного преобразователя в сочетании с быстрой цифровой регулировкой процесса; это предотвращает взрывообразный переход капли при коротком замыкании путем резкого увеличения сварочного тока. Такой процесс можно использовать при сварке тонкого металла толщиной до 3 мм.

3.7. Дуговая сварка под водой

Процесс дуговой сварки под водой существенно не отличается от сварки на воздухе: дуга плавит металл под водой так же, как и на воздухе.

В 1887 г. Н.Н. Бенардос совместно с Д.А. Логиновским в лабораторных условиях впервые в мировой практике осуществили дуговую подводную резку угольным электродом. В 1932 г. К.К. Хренов разработал электроды для подводной сварки и выполнил их испытания в натуральных условиях Черного моря.

Особенностями процесса сварки под водой являются следующие:

- ◇ дуга заключена в постоянно меняющийся парогазовый объем, поддерживаемый парами воды, продуктами их распада, газообразными выделениями электродных материалов. Продукты разложения воды – водород и кислород, находящийся в зоне дуги, оказывают заметное влияние на качество сварных швов. Водород интенсивно растворяется в жидком металле, вызывая охрупчивание швов, а кислород окисляет сталь, в первую очередь содержащиеся в ней легирующие примеси. Оксиды частично всплывают, переходя в шлак, а частично остаются в металле шва в виде неметаллических включений, уменьшающих вязкость и пластические свойства металла шва;
- ◇ из-за непосредственного контакта с водой основного металла и металла шва теплоотдача при подводной сварке значительно выше, чем при сварке на воздухе, что может привести к появле-

нию закалочных структур в металле шва и зоне термического влияния;

• наличие повышенного давления и охлаждающее действие среды приводят к сжатию столба дуги и повышению его температуры. Это может увеличивать температурный градиент металла шва и вызывать перегрев электродного металла.

Режим сварки под водой характеризуется повышенным напряжением (на 6—7 В) и большим (на 10—25 %) сварочным током, достигающим 50—60 А на 1 мм диаметра электрода. Сварку ведут на постоянном токе прямой полярности. Переменный ток более опасен для сварщиков и не обеспечивает устойчивого горения дуги.

Сварку выполняют без поперечных колебаний, электрод перемещают по линии стыка с опиранием на выступающий край козырька обмазки.

Электроды имеют толстое водонепроницаемое покрытие, которое состоит из смеси порошков — железного сурика (80 %) и мела (20 %) с добавлением жидкого стекла — и пропитывается в расплавленном парафине, растворе целлулоида в ацетоне. Если покрытие недостаточно водонепроницаемое, то горение дуги становится неустойчивым. Ток со стержня переходит в воду, разлагает ее, а выделяющийся на электроде водород разрушает покрытие.

При необходимости используют обычные электроды с толстым покрытием, но их предварительно пропитывают, придав покрытию водонепроницаемость, а сварку ведут с помощью специальных электрододержателей, в которых металлические части изолированы.

Ручная подводная сварка обладает маневренностью, требует простого оборудования, для ее осуществления не нужны специальные приспособления для удаления воды из зоны сварки (по существующей терминологии, это «мокрый» способ сварки), что обуславливает низкую стоимость подводных сварочных работ. Однако она имеет серьезные недостатки. Основные из них: невозможность получения сварных соединений, равнопрочных основному металлу; требование высокой квалификации водолаза-сварщика; низкая производительность процесса. Кроме того, каждые 1—2 мин необходимо менять электрод, что в подводных условиях является непростой

операцией; дуга, горящая между металлическим стержнем электрода и изделием, закрыта козырьком обмазки, что ухудшает наблюдение за формированием шва.

Для улучшения механических свойств сварных соединений попытались применить сварку трубчатым электродом с подачей через центральный канал аргона, который должен был препятствовать поглощению водорода металлом шва. Однако это не привело к желаемым результатам. По-видимому, интенсивные потоки пара, перемещаясь от поверхности раздела пар—вода к столбу дуги, нарушают газовую защиту, делая ее ненадежной.

За рубежом разработана «сухая» сварка под водой. Этот способ, основанный на использовании специальных обитаемых камер, которые устанавливаются на участке трубопровода и герметизируются в местах входа и выхода труб, показался привлекательным тем, что при разработке и изготовлении накидной камеры для трубопровода нужного диаметра вопрос подводной сварки был решен, так как сварочные материалы и оборудование использовались те же, что и для сварки на воздухе. Но в этом случае только на подготовку технических средств обслуживания сварки требуется 2–3 недели; кроме того, такая сварка неманевренна, неуниверсальна и чрезвычайно дорогостояща.

Этих серьезных недостатков нет у необитаемой мини-камеры, которая представляет собой относительно небольшой цилиндр, на одном его торце, обращенном к сварщику, размещено прозрачное днище, а на другом, обращенном к изделию, — эластичный фланец. Горелка сварочного полуавтомата с помощью гибкого уплотнителя вводится через боковую поверхность цилиндра так, что сварщик может манипулировать рукояткой, перемещая дугу в направлении сварки и выполняя поперечные колебательные движения. Однако этот способ связан с другими трудностями. Так, при сварке водолаз вынужден одной рукой прижимать камеру к изделию, другой — манипулировать горелкой, а для фиксации своего тела у него нет физических возможностей.

Перспективна «мокрая» полуавтоматическая сварка порошковой проволокой, сочетающая механическую подачу проволоки в зону дуги, что предотвращает или по крайней мере уменьшает попадание водорода в металл шва, с маневренностью и универсальностью ручной сварки. Проведенные испытания показали, что при подводной сварке самозащитной порошковой проволокой обеспечивается стабильное горение дуги и получение на низкоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталях сварных соединений, равнопрочных

основному металлу. На рис. 3.34 представлены полуавтоматические установки для механизированной подводной сварки разработки ИЭС им. Е.О. Патона.

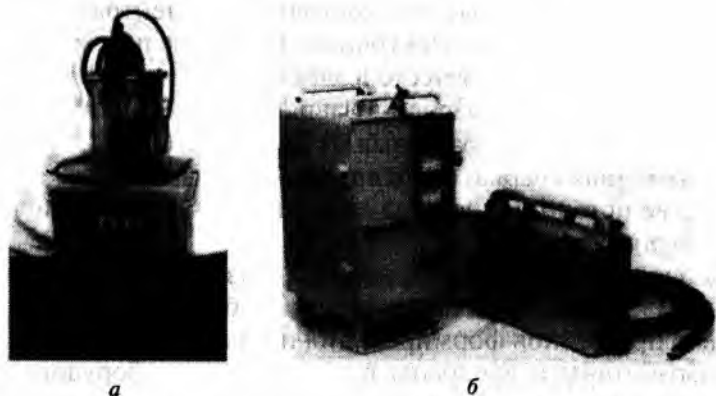


Рис. 3.34. Полуавтоматы для подводной сварки А1450 «Нептун 4» (а) и ПШ141 (б)

К аппаратам для полуавтоматической сварки под водой предъявляются особые требования, обусловленные спецификой среды. При сварке на глубинах до 2 м полуавтомат может находиться над поверхностью воды; в этом случае под воду погружается только гибкий шланг с держателем. При работе на больших глубинах необходимы так называемые узлы — подающий механизм с гибким шлангом и держателем, катушка с электродной проволокой, провода управления и сварочные кабели с быстродействующими разъемными муфтами. Чтобы защитить электродвигатель механизма подачи от окружающей воды, подающий механизм и катушка с электродной проволокой смонтированы в резиновом контейнере, внутренняя полость которого заполнена водой. Несмотря на это, утечки полностью отсутствуют благодаря изоляции металлических деталей от воды, окружающей контейнер.

Соединения, сваренные под водой, показали высокую стойкость против образования и распространения трещин, что дает основание рекомендовать полуавтоматическую подводную сварку как для восстановления, так и для строительства самых ответственных металлоконструкций.

3.8. Дуговая плазменная сварка

Плазмой принято считать частично или полностью ионизированный газ, состоящий из нейтральных атомов и молекул, ионов и электронов. Типичное плазменное состояние вещества имеет место в электрическом газовом разряде. Плазма газового разряда в зависимости от состава среды характеризуется температурами от 2000 до 50 000 °С.

Плазменная сварка, относящаяся к дуговым видам сварки, в качестве источника нагрева свариваемых заготовок использует *сжатую дугу*.

Первое упоминание о разработке плазменной сварки относится к 1950-м гг. В течение 1960-х гг. было предложено несколько принципов формирования плазменно-газового потока, разработаны и внедрены в производство оборудование и технология процесса. В настоящее время постоянно осуществляется развитие, совершенствование плазменной сварки и поиск новых областей ее применения как у нас в стране, так и за рубежом.

При обычной дуговой сварке дуга горит свободно между электродом и изделием. Если при помощи каких-либо приемов не дать возможность дуге занять ее естественный объем, принудительно сжать ее, то температура дуги значительно повысится. В частности, можно ограничить диаметр столба дуги, пропустив ее через сопло малого диаметра. При этом плазмообразующий газ, вытекая через сопло горелки, сжимает дугу. Часть газа, проходя через столб дуги, нагревается, ионизируется и выходит из сопла в виде плазменной струи. Наружный слой, омывающий столб дуги, остается относительно холодным и создает электрическую и тепловую изоляцию между дугой и соплом, предохраняя его от разрушения.

Плазменные струи получают в *плазменных горелках*, которые называют также *плазмотронами*. В промышленности находят применение главным образом дуговые плазменные горелки постоянного тока. Наиболее распространены способы получения плазменных струй путем интенсивного охлаждения газовым потоком столба дуги, горящей в сравнительно узком водоохлаждаемом канале плазменной горелки.

В инженерной практике используют две основные принципиальные схемы дуговых плазменных горелок.

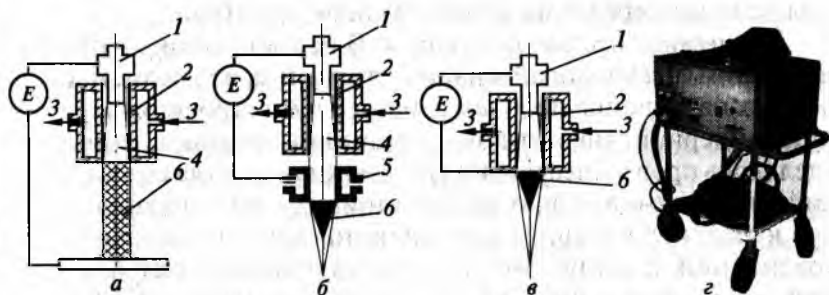


Рис. 3.35. Принципиальные схемы дуговых плазменных горелок (плазмотронов) для получения:

а — плазменной дуги; б, в — плазменной струи; г — общий вид установки для микроплазменной сварки МПУ-2; 1 — электрод; 2 — канал; 3 — охлаждающая вода; 4 — столб дуги; 5 — сопло; 6 — плазменная струя; Е — источник тока

В горелках *прямого действия*, предназначенных для сварки плазменной дугой, одним из электродов является обрабатываемый материал (рис. 3.35, а) и используются два энергетических источника — плазменная струя и электрически активное пятно дуги. Внутренний КПД такой горелки, т.е. использование подведенной к ней электроэнергии, достигает 60—80 %.

В горелках *косвенного действия* для сварки плазменной струей (рис. 3.35, б, в) с целью снижения тепловой нагрузки на электроды применяют плазменные горелки с магнитным закручиванием дуги. Максимальные значения внутреннего КПД таких горелок (при больших расходах газа) достигают 50—70 %. Часть энергии дуги расходуется на нагрев электродов разряда, а также рассеивается в окружающее пространство вследствие лучистого и конвективного теплообмена.

Состав плазмообразующего газа (аргон, гелий, азот и проч.) выбирают в зависимости от требований, предъявляемых к процессу. Электроды изготовляют обычно из меди и вольфрама. Стенки камеры защищены от теплового воздействия дуги слоем сравнительно холодного газа.

Основными параметрами регулирования тепловых характеристик плазменной струи являются сила тока, длина дуги и расход плазмообразующего газа. Увеличение силы тока и дли-

ны дуги приводит к возрастанию температуры струи; повышение расхода плазмообразующего газа при больших его значениях снижает среднемассовую температуру струи.

Применение плазменной сварки. В исследованиях в области плазменных технологий в нашей стране и за рубежом, направленных на решение проблем авиа- и ракетостроения, электроники, ядерной энергетики, криогенной техники, внимание уделялось преимущественно улучшению качества сварки изделий из алюминия, коррозионно-стойких и жаропрочных сплавов и титана в большом диапазоне толщин, различных типов соединений. В конце 1960-х гг. сварка проникающей плазменной дугой переменного тока была использована в СССР при производстве алюминиевых топливных баков ракет. Аналогичная технология спустя 10 лет была внедрена в США взамен аргонодуговой при сварке наружных алюминиевых баков на многоразовом космическом корабле «Шаттл». Этой технологии отводят большую роль и при строительстве космических станций. В 1989 г. NASA выбрала технологию плазменной сварки для изготовления твердотопливных двигателей космической ракеты для доставки конструкций международной космической станции «Freedom».

Преимущества плазменной сварки состоят в следующем:

- ♦ более стабильное горение дуги и более равномерное проплавление кромок, чем при аргонодуговой плазменно-дуговой сварке;
- ♦ проплавляющая способность — средняя между электронным лучом и дугой, горящей в аргоне;
- ♦ цилиндрическая форма столба дуги и струи плазмы, вследствие чего площадь поверхности металла, через которую осуществляется теплопередача от струи к металлу, не зависит от расстояния между электродом горелки и изделием;
- ♦ меньшая чувствительность к изменению длины дуги, чем у аргонодуговой сварки, благодаря цилиндрической форме столба дуги. Изменение длины дуги конической формы (при аргонодуговой сварке) всегда ведет к изменению диаметра пятна на грева и соответственно ширины шва. При плазменной сварке диаметр пятна практически постоянный, что дает возможность стабилизировать проплавление основного металла. Это свойство плазменной дуги используется при сварке очень тонких листов.

Микроплазменной дугой (сила тока 0,1–15 А) сваривают листы толщиной 0,025–0,8 мм из углеродистой и нержавеющей стали, меди, инконеля, хастеллоя, ковара, титана, тантала, молибдена, вольфрама, золота и др.

Источники питания позволяют вести процесс в непрерывном и импульсном режимах.

По сравнению с аргонодуговой сваркой микроплазменная имеет следующие важные преимущества:

- ♦ изменение длины микроплазменной дуги оказывает значительно меньшее влияние на качество сварного соединения деталей малых толщин;
- ♦ дежурная плазменная дуга уверенно зажигается при токах менее 1 А;
- ♦ улучшается доступ к объекту сварки и зрительный обзор рабочего пространства (на токе 15 А длина дуги достигает 10 мм).

При микроплазменной сварке наиболее распространены соединения с отбортовкой.

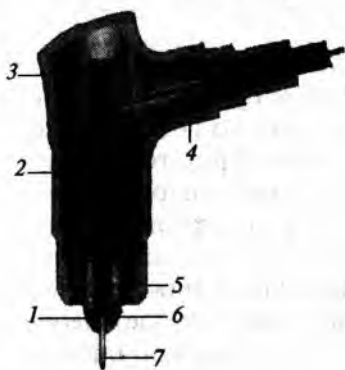


Рис. 3.36. Плазматрон TransCut 300 для плазменной резки с использованием жидкости вместо газа:

1 – режущее сопло; 2 – нагревающий элемент; 3 – катод; 4 – жидкая среда; 5 – газовая среда; 6 – ионизация среды; 7 – плазменная струя

Микроплазменная сварка (рис. 3.35, з) находит широкое применение в радиоэлектронике и приборостроении для сварки тонких листов и фольги. В авиационной промышленности с помощью микроплазменной сварки изготавливают детали толщиной 0,1–0,5 мм типа сильфонов, тонкостенных трубопроводов, деталей приборов из легированных сталей, алюминиевых сплавов, тугоплавких металлов. В последнее время микроплазменная сварка распространена в производстве и ремонте деталей электроники и космонавтики, измерительных инструмен-

тов, часов (в том числе ручных), ювелирных изделий, металлических фильтров, термопар и тонкостенных трубок, зубном протезировании.



Рис. 3.37. Мобильная система плазменной резки TransCut 300

Плазменная резка с использованием жидкости вместо газа — одна из последних разработок. В этом процессе, предложенном компанией «Fronius», вместо сжатого воздуха исходной средой выступает жидкость (рис. 3.36). При этом достигаются: повышенная мобильность установки, экологичность процесса за счет пониженного выброса вредных частиц. Эти преимущества обеспечивает использование жидкости в качестве исходной среды. Она не требует большого пространства, может легко храниться на месте. При этом исчезает необходимость в подсоединении к стационарным или мобильным системам газоснабжения или генерирования сжатого воздуха. При весьма низких выбросах жидкая среда способствует обеспечению экологически безопасной резки и существенно улучшает условия работы. Система плазменной резки TransCut 300 является самой миниатюрной и самой легкой (14,6 кг) в своем классе (рис. 3.37). Высококачественная резка «Fronius» достигается на 6-миллиметровой листовой стали, алюминиевых сплавах и высоколегированных сталях. Можно разрезать металл толщиной до 10 мм. Для работы необходимы подвод питания 230 В и совместимость с генератором. Жид-

кая режущая среда находится во встроенном баке вместимостью 1,5 л. Бак может быть дозаправлен с помощью картриджей. Жидкость в парообразном состоянии выступает в качестве среды для плазмы. На обычной строительной площадке один бак прослужит около месяца.

3.9. Комбинированный процесс точечной плазменно-дуговой сварки

Дуговую точечную сварку нахлесточных соединений различных металлов и сплавов обычно выполняют плавящимся электродом, предварительно просверлив и прозенковав в верхнем листе отверстия диаметром, превышающим диаметр электрода не менее чем на 3–8 мм. Такая технология обеспечивает проплавление верхнего листа и уменьшение выпуклости электрозаклепочного шва. Однако сверление отверстий увеличивает трудоемкость работ, производимых перед общей сборкой и сваркой металлоконструкций.

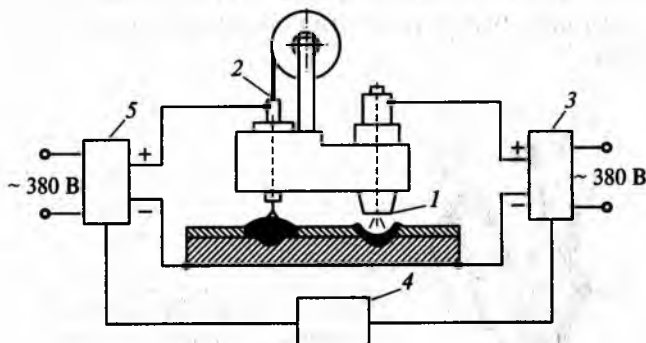


Рис. 3.38. Схема комбинированного процесса точечной плазменно-дуговой сварки

Более технологичен комбинированный процесс точечной сварки (рис. 3.38), предусматривающий сквозное проплавление листов с использованием плазменной горелки 1 и последующую заварку полученных отверстий дугой с плавящимся электродом 2. Расстояние от оси горелки до оси мундштука с плавящимся электродом регулируют в диапазоне 30–100 мм.

Питание плазменного и дугового разрядов осуществляют от отдельных источников 3 и 5, управляемых программирующим устройством 4.

При комбинированном процессе оба источника нагрева, находясь на определенном расстоянии друг от друга, создают единый термический цикл нагрева. Электромагнитное взаимодействие плазмы и дуги в данном варианте отсутствует. Если плазменная струя и сварочная дуга с плавящимся электродом действуют совместно практически в одну точку сварочной ванны, то происходит гибридный процесс плазменно-дуговой сварки.

Один из вариантов горелки для гибридного процесса (рис. 3.39) состоит из плазмотрона, механизма подачи электродной проволоки и водоохлаждаемого корпуса с соплом для подачи защитного газа (углекислого газа, аргона либо смеси аргона с углекислым газом). Токопроводящий медный мунштук для плавящегося электрода размещен соответственно с горелкой, расположенной непосредственно за плазмотроном. Диаметр электродной проволоки в зависимости от толщины свариваемого металла для обоих процессов составляет 1,2–1,6 мм.

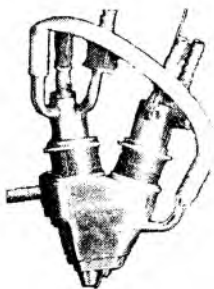


Рис. 3.39. Горелка для гибридного процесса точечной плазменно-дуговой сварки

Для комбинированного и гибридного процессов точечной плазменно-дуговой сварки разработан универсальный источник питания «Патон А-500», предназначенный для плазменной и дуговой сварки импульсами постоянного, переменного и асимметричного тока. Постоянный ток прямой полярности используют для проплавления отверстий в углеродистых и легиро-

ванных сталях, меди, никеле и др. Легкие металлы проплавляют переменным током.

Внешний вид точечных соединений, полученных комбинированным способом плазменно-дуговой сварки, характеризуется равномерным формированием швов, стабильной глубиной проплавления верхнего и нижнего листов и отсутствием пор и трещин. При этом размеры швов соизмеримы с принятыми для аналогичных точечных соединений.

Данную технологию точечной плазменно-дуговой сварки целесообразно применять вместо клепки и дуговой сварки прерывистыми швами плавящимся и неплавящимся электродами.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие способы электрической дуговой сварки вы знаете?
2. Какие виды соединений выполняют электрической дуговой сваркой?
3. При каких условиях происходит устойчивое горение электрической дуги?
4. Что отражает статическая вольт-амперная характеристика электрической дуги?
5. Какие источники электрической энергии используют при дуговой сварке?
6. В чем суть сварки закладным электродом?
7. Какие элементы входят в состав покрытых электродов и какую роль они выполняют при электродуговой сварке?
8. По какой методике осуществляют выбор основных параметров режима ручной электродуговой сварки покрытыми электродами?
9. В чем суть процесса автоматической сварки под флюсом? В чем ее преимущества и недостатки?
10. Какие способы электродуговой сварки в среде защитных газов вы знаете?
11. В каких случаях целесообразно использовать вольфрамовые электроды при сварке в углекислом газе?
12. В чем различие аргонодуговой сварки неплавящимся и плавящимся электродами?

13. Какой род тока и какой полярности применяют при аргонодуговой сварке и при сварке в углекислом газе?
14. Каким оборудованием и какими приборами должен быть обеспечен пост сварки в среде защитными газами?
15. Возможна ли сварка под водой и что для этого необходимо?
16. Чем отличается процесс плазменной сварки от аргонодуговой?

ГЛАВА 4 НОВЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

4.1. Электрошлаковая сварка

Исторически возникновение электрошлаковой сварки (ЭШС) было обусловлено потребностью автоматизировать процесс сварки под флюсом вертикальных швов. В Институте электросварки, разрабатывая способ получения вертикальных швов с принудительным формированием, обнаружили, что при глубине шлаковой ванны более 40 мм и ее перегреве дуговой процесс становится неустойчивым и даже прекращается, однако при этом электродный металл, флюс и кромки свариваемых заготовок плавятся. В 1949 г. на основании этого эффекта была разработана ЭШС.

Электрошлаковая сварка — процесс образования неразъемного соединения, при котором расплавление основного и присадочного металлов осуществляется за счет теплоты, выделяемой при протекании электрического тока через расплавленный флюс. При этом слой расплавленного флюса служит защитой металла сварочной ванны от взаимодействия с кислородом и азотом воздуха. Схемы процесса и установка ЭШС приведены на рис. 4.1.

Шлаковая ванна образуется за счет расплавления флюса, заполняющего пространство между кромками основного металла и специальными охлаждаемыми водой приспособлениями-ползунами, плотно прижатыми к поверхности свариваемых деталей.

Флюс плавится дугой, возникающей в начальный период сварки между основным металлом и электродной проволокой. После расплавления определенного количества флюса дуга шунтируется расплавленным шлаком и гаснет. Длина шлаковой ванны практически равна толщине основного металла, ширина определяется зазором между свариваемыми кромка-

ми, а глубину выбирают в зависимости от технологических условий (состава основного металла, режима сварки и др.).

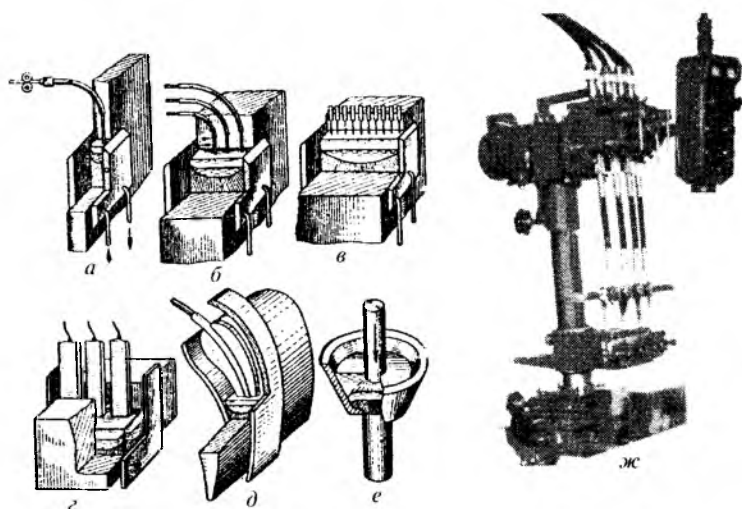


Рис. 4.1. Основные схемы процессов ЭШС и трехэлектродная установка VUZ-ETZ-450 (ж):

а — сварка одним электродом металла толщиной до 60 мм; *б* — трехфазная ЭШС металла толщиной 450 мм тремя электродами с возвратно-поступательным движением; *в* — многоэлектродная ЭШС металла практически неограниченной толщины; *г* — ЭШС пластинчатыми электродами; *д* — ЭШС плавящимся мундштуком; *е* — контактно-шлаковая сварка стержней

Необходимая для осуществления процесса энергия получается от источника питания с жесткой характеристикой переменного или постоянного тока, подсоединяемого к основному металлу и плавящемуся электроду (электродам), вводимому в зазор между свариваемыми кромками и погруженному в шлаковую ванну. Электрод располагают посередине шлаковой ванны или перемещают в зазоре от одной поверхности свариваемых деталей к другой. Ток к электроду подводится при помощи мундштука. Протекая через шлаковую ванну, ток нагревает ее до температуры 2000 °С, превосходящей температуру плавления основного и электродного металлов.

Шлак расплавляет кромки основного металла и электрод, который подается в шлаковую ванну со скоростью, равной скорости его плавления. Расплавленные электродный и основ-

ной металлы стекают на дно шлаковой ванны, образуя сварочную (металлическую) ванну. При удалении источника нагрева происходит кристаллизация металла сварочной ванны. От воздействия воздуха металл надежно защищает расплавленный шлак, находящийся над металлической ванной. По мере заполнения зазора между свариваемыми кромками мундштук при помощи специального привода передвигается вдоль свариваемого изделия.

Шлаковая ванна, наведенная в начале сварки, по мере формирования шва перемещается от его начала к концу детали и, соприкасаясь с охлажденными ползунами, образует на них тонкую шлаковую корку, которая исключает непосредственный контакт расплавленного металла с поверхностью ползуна.

При этом расход флюса сварки не превышает 5 % массы наплавленного металла. Из-за малого количества шлака остывание наплавленного металла происходит в основном за счет электродной проволоки, а доля основного металла в сварном шве может быть снижена до 10–20 %.

Шлаковая ванна является менее концентрированным источником теплоты, чем сварочная дуга, поэтому ЭШС характеризуется более медленным нагревом и охлаждением. Значительное время пребывания металла в расплавленном состоянии способствует улучшению условий удаления газов и неметаллических включений из металла шва.

Электрошлаковый процесс протекает устойчиво даже при плотностях тока j около $0,1 \text{ А/мм}^2$ (ср.: при ручной дуговой сварке покрытыми электродами $j = 10\text{--}30 \text{ А/мм}^2$; при автоматической под слоем флюса $j = 200 \text{ А/мм}^2$; при сварке плавящимся электродом в защитных газах $j = 400 \text{ А/мм}^2$), поэтому возможно использование электродов довольно большого сечения.

Как правило, ЭШС ведут при вертикальном положении изделий. Зеркало сварочной ванны, так же как и при сварке в нижнем положении, расположено в горизонтальной плоскости, а перемещение расплавленного электродного и основного металлов происходит в направлении сил тяжести.

Обычно сварка начинается в прикрепленном к нижней части стыка металлическом кокиле длиной 50–100 мм, где возбуждается дуговой процесс. Для того чтобы вывести шлаковую

ванну и предотвратить образование усадочных трещин и рыхлоты в конце шва, на изделии устанавливаются выходные планки длиной около 100 мм (рис. 4.2).

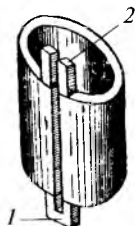


Рис. 4.2. Начальные (1) и выходные (2) планки, применяемые при ЭШС

Основные виды соединений, выполняемых ЭШС, даны на рис. 4.3.

С помощью ЭШС можно выполнять не только прямолинейные швы, но и кольцевые (рис. 4.4). Вращение изделия осуществляется на роликовой опоре или другим способом.

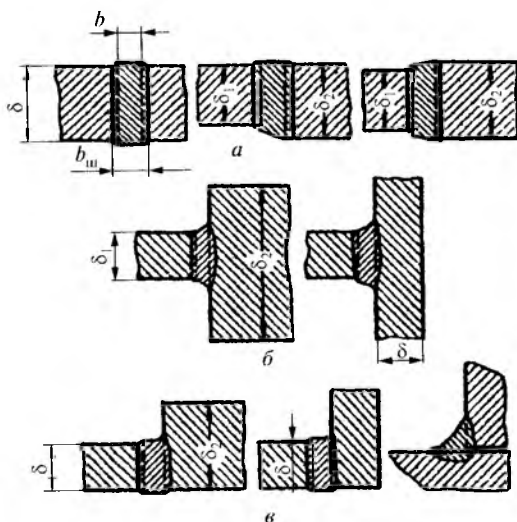


Рис. 4.3. Виды соединений, выполняемых ЭШС: а — стыковые; б — тавровые; в — угловые; δ — толщина металла; b — ширина зазора; b_w — ширина шва

При сварке металла большой толщины используются однопроходная ЭШС и дуговая сварка с принудительным формированием. Однопроходные способы сварки отличаются высокой производительностью, но не всегда обеспечивают требуемые механические свойства сварного соединения вследствие перегрева металла шва и околошовной зоны.

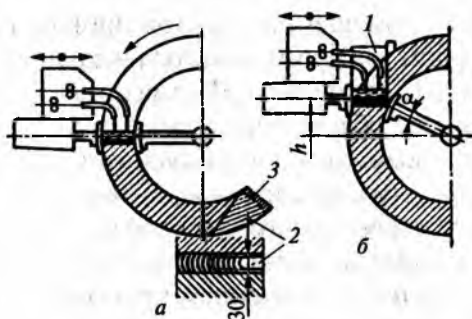


Рис. 4.4. Схема ЭШС кольцевого шва:

а — сварка средней части шва; *б* — замыкание шва; *1* — выходной коиль; *2* — разделка начала шва для его замыкания; *3* — заходная планка; α — угол перемещения ползуна к началу замыкания шва; *h* — высота подъема аппарата к началу замыкания шва

4.2. Сварка электронным лучом

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) основана на использовании энергии электронного луча для нагрева. Сущность данного процесса состоит в использовании кинетической энергии электронов, движущихся в высоком вакууме с большой скоростью. При бомбардировке электронами поверхности металла подавляющая часть кинетической энергии электронов превращается в теплоту, которая направляется для расплавления металла.

Для сварки необходимо:

- ♦ получить свободные электроны, что осуществляется за счет применения раскаленного металлического катода, эмитирующего (испускающего) электроны;
- ♦ сообщить электронам большую скорость с целью увеличения их энергии, что обеспечивается электрическим полем с высокой разностью потенциалов между катодом и анодом;
- ♦ сфокусировать электроны, что достигается при использовании кольцевых магнитных полей;
- ♦ обеспечить резкое торможение электронного потока, что происходит автоматически при внедрении электронов в металл.

Электронный луч, используемый для сварки, создается в *электронной пушке*, представляющей собой устройство, с помощью которого получают узкие электронные пучки с большой плотностью энергии (рис. 4.5). Питание пушки осуществляется от высоковольтного источника постоянного тока. Пуш-

ка (рис. 4.5, *а*) имеет катод 1, размещенный внутри прикатодного электрода 2. На некотором удалении от катода находится ускоряющий электрод — анод 3 с отверстием. Форма прикатодного и ускоряющего электродов обеспечивает такое строение электрического поля между ними, которое фокусирует электроны в пучок диаметром, равным диаметру отверстия в аноде. Положительный потенциал ускоряющего электрода может достигать нескольких десятков тысяч вольт, поэтому электроны, эмитированные катодом, на пути к аноду приобретают значительную скорость и соответственно кинетическую энергию. После ускоряющего электрода электроны движутся равномерно. Электроны имеют одинаковый заряд, поэтому они отталкиваются друг от друга, вследствие чего диаметр пучка увеличивается, а плотность энергии в пучке уменьшается.

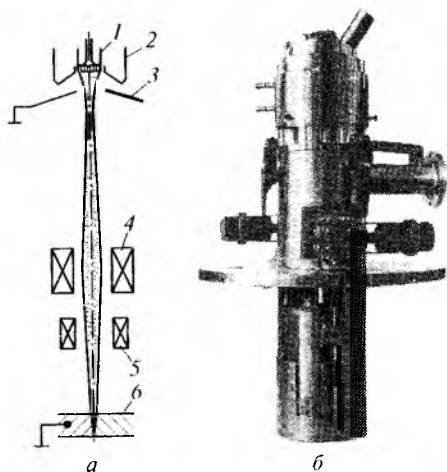


Рис. 4.5. Схема устройства электронно-лучевой пушки (*а*) и общий вид пушки ЭЛТП-60/30 (*б*)

С целью увеличения плотности энергии в луче после выхода из анода электроны фокусируются магнитным полем в специальной магнитной линзе 4. Сфокусированные в плотный пучок летящие электроны ударяются с большой скоростью о поверхность изделия 6, при этом кинетическая энергия электронов вследствие торможения в веществе превращается в теплоту, нагревая металл до высоких температур. Для перемещения луча по свариваемому изделию на пути электронов поме-

щают магнитную отклоняющую систему 5, направляющую электронный луч точно по сварочному стыку.

Для обеспечения беспрепятственного движения электронов от катода к аноду и далее к изделию, для тепловой и химической изоляции катода, а также для предотвращения возможности дугового разряда между электродами в установке создается высокий вакуум не хуже $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па ($1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.), обеспечиваемый вакуумной системой установки.

Работа, затраченная электрическим полем на перемещение заряда из одной точки в другую, равна произведению заряда (в данном случае электрона e) на разность потенциалов между этими двумя точками: $A = eU$. Эта работа затрачивается на сообщение электрону кинетической энергии $E = m_e v^2/2$, или $eU = m_e v^2/2$.

Энергия электронов зависит от разности потенциалов разгоняющего поля; в настоящее время эксплуатируются электронно-лучевые установки с ускоряющим напряжением в электронно-лучевой пушке до 200 кВ.

При сварке электронным пучком формируется узкий глубокий шов: глубина проплавления достигает 200–400 мм, а отношение глубины проплавления к средней ширине шва составляет 20–30 (рис. 4.6). Столь глубокое проникновение электронов в металл объясняется образованием канала в сварочной ванне практически на всю ее глубину. Основным фактором, вызывающим образование канала в жидком металле, является давление отдачи пара при испарении металла. В связи с этим канал в сварочной ванне часто называют *пародинамическим*.

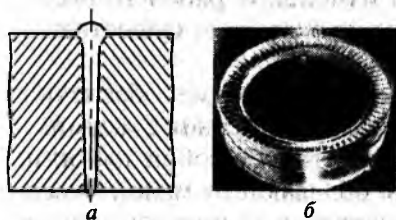


Рис. 4.6. Типичная форма сварного шва при ЭЛС (а) и общий вид статора низкого давления газотурбинного двигателя, изготовленного ЭЛС (б)

Технологические возможности и преимущества ЭЛС представлены ниже.

- При ЭЛС возможно соединение за один проход металлов и сплавов толщиной от 0,1 до 400 мм — наиболее широкий среди методов сварки диапазон.

- ◇ Благодаря высокой концентрации энергии в луче, минимальному вводу теплоты и высокой скорости охлаждения зона термического влияния при ЭЛС имеет незначительную протяженность и снижение свойств в ней относительно невелико. Это имеет особое значение для аустенитной стали, сплавов циркония, молибдена и других металлов, склонных при нагреве к значительному росту зерна и снижению коррозионной стойкости.
- ◇ Глубокое проплавление металла при малой погонной энергии при ЭЛС обуславливает большую скорость отвода теплоты от зоны сварки, что обеспечивает увеличение скорости кристаллизации малой по объему сварочной ванны с получением мелкокристаллического строения металла шва, по своим свойствам мало отличающегося от основного металла.
- ◇ Ввод значительно меньшего, чем при дуговой сварке, количества теплоты при ЭЛС, особенно в импульсном режиме, дает возможность во много раз уменьшить деформации изделий.
- ◇ Большая концентрация энергии в малом поперечном сечении луча и возможность переноса энергии лучом на значительное расстояние от катода позволяют использовать электронный луч при сварке в узкую щель, когда методы дуговой сварки неприменимы.
- ◇ При ЭЛС рабочее расстояние электронная пушка — изделие можно изменять в значительных пределах без существенного изменения параметров шва. Рабочее расстояние выбирается в пределах 50—120 мм для низковольтных пушек и 50—500 мм — для высоковольтных. При этом изменение рабочего расстояния в процессе сварки на 1—5 мм не оказывает существенного влияния на качество соединения.
- ◇ При ЭЛС, осуществляемой в высоком вакууме, обеспечивает эффективная защита металла от взаимодействия с газами.
- ◇ Поскольку электронный луч представляет собой пучок первичных ускоренных электронов, обладающих малой массой и отрицательным электрическим зарядом, то при помощи электромагнитного поля, практически безынерционного, можно сканировать этот луч по выбранной траектории с большей частотой. Для реализации этой идеи разработано программное обеспечение, позволяющее «размножать» зоны облучения (рис. 4.7), т.е. выполнять одновременно несколько (пять и бо-

лее) сварных швов с целью увеличения производительности или уменьшения деформации свариваемого изделия, а также и воздействовать на процессы кристаллизации металла сварочной ванны или структурные превращения в металле шва и околошовной зоне в пределах одной зоны облучения.

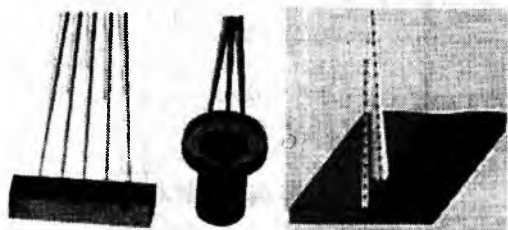


Рис. 4.7. ЭЛС с параллельными лучами

- ♦ Энергетические затраты при ЭЛС существенно (в 8–10 раз) ниже, чем в других методах сварки.

ЭЛС является наиболее рациональным методом соединения: изделий из тугоплавких металлов, из термически упрочненных металлов, когда нежелательна, затруднена или невозможна последующая термообработка; изделий после окончательной механической обработки при необходимости обеспечения минимальных сварочных деформаций; ответственных конструкций больших толщин.

Недостатками метода ЭЛС являются:

- ♦ сложность и высокая стоимость оборудования;
- ♦ наличие вакуумных камер, что ограничивает размеры свариваемых изделий;
- ♦ вредное рентгеновское излучение в процессе ЭЛС;
- ♦ необходимость в высококвалифицированном персонале.

Установки для ЭЛС в высоком вакууме, схема и общий вид одной из которых приведены на рис. 4.8, используются для микросварки и размерной обработки в радиоэлектронике, приборостроении, точной механике, а также для сварки изделий малых, средних и крупных габаритов в ядерной энергетике, авиастроении и ракетной технике.

Вакуум космического пространства может быть использован для ЭЛС деталей и узлов при сборке космических платформ и ремонтных работах. В ИЭС им. Е.О. Патона создана и прошла успешные испытания на борту орбитальной станции

«Мир» аппаратура и набор специализированных инструментов для выполнения ручной ЭЛС в космосе.

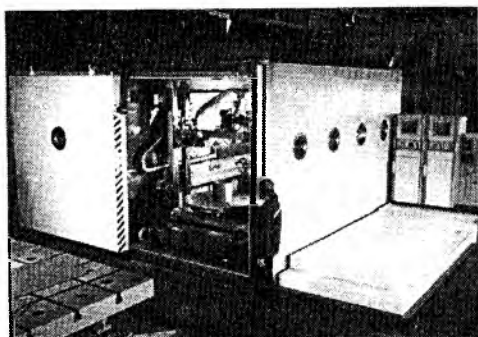
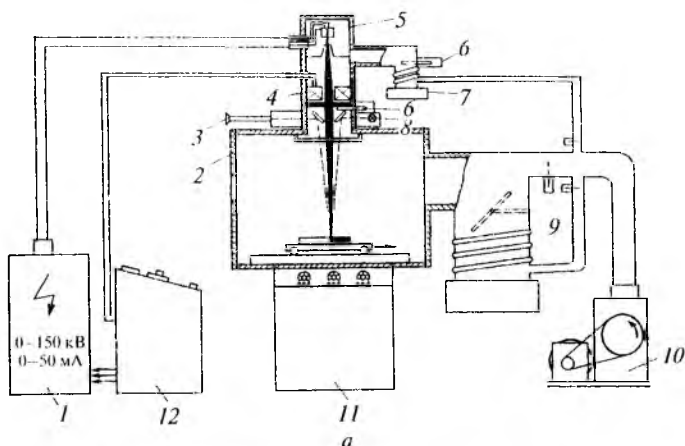


Рис. 4.8. Принципиальная схема (а) и общий вид установки для ЭЛС (б):

1 — высоковольтный источник питания; 2 — сварочная камера; 3 — телескопическое устройство для наблюдения; 4 — электромагнитная линза и отклоняющие катушки; 5 — электронно-лучевая пушка; 6 — вентиль; 7 — диффузионный насос; 8 — освещение; 9 — вакуумный вентиль; 10 — роторный форвакуумный насос; 11 — пульт управления движением детали; 12 — электрический пульт управления

В настоящее время используются различные рабочие камеры для оснащения установок для ЭЛС. Оптимальным вариантом считаются универсальные рабочие камеры, где обрабатываемая деталь перемещается в трех направлениях. Однако при этом возможен довольно продолжительный простой, тогда как

все этапы работы (зажим оснастки, загрузка обрабатываемой детали, вакуумирование, сварка, вентиляция, снятие обрабатываемой детали) должны выполняться один за другим. Для сокращения рабочих циклов создано специальное оборудование — двухкамерные, конвейерные машины, шлюзовые камеры установки циклического действия.

В *двухкамерных установках* (рис. 4.9, а) рабочие камеры расположены рядом. Генератор луча либо перемещается от одной камеры к другой, либо за один проход отклоняется только в сторону одной камеры. Поэтому сварка может выполняться в одной камере, в то время как в другой будут производиться загрузка, разгрузка или вакуумирование. Если время сварки превышает время обработки детали или вакуумирования, используется полный объем двух камер. Недостатком данного оборудования является то, что обе камеры должны быть оснащены отдельными перемещающими устройствами и насосными установками.

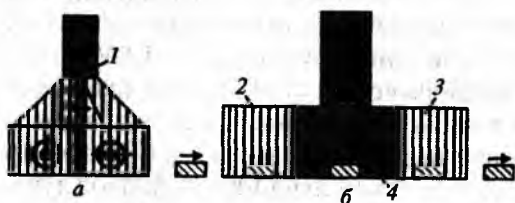


Рис. 4.9. Схемы вакуумных камер:

а — двухкамерная установка; б — шлюзовая установка; 1 — отклоняемый луч; 2, 3 — вакуумные затворы; 4 — отсек с высоким вакуумом

В шлюзовых сварочных установках (рис. 4.9, б) высокий вакуум поддерживается постоянно в той камере, где выполняется сварка. Перемещающиеся устройства проходят через одну или обе камеры. Установки могут работать в режиме загрузки и разгрузки, имеют затвор для вентиляции и деаэрации, а также вакуумный затвор.

Конвейерные машины являются наиболее производительным, но «негибким» типом оборудования, работающим на том же принципе, что и шлюзовые сварочные установки. Обрабатываемые детали непрерывно подаются центрирующими кулачками через пневматические затворы в рабочую камеру и от-

туда обратно через пневматический затвор. При этом необходимо постоянно поддерживать высокий вакуум.

Установки циклического действия являются оптимальными для ЭЛС подобных деталей с идентичной геометрией шва и осесимметричными швами. Под камерой (обычно небольшой вместимости), оснащенной одной или несколькими установками загрузки деталей с коротким временем вакуумирования, установлено поворотное приспособление с вертикальной, горизонтальной и поворотной осями. Поэтому загрузка, разгрузка и сварка могут выполняться одновременно.

Безвакуумный способ, при котором ЭЛС осуществляется в атмосфере воздуха и вакуумная камера не нужна, разработан в Германии. В этом случае не имеют значения время вакуумирования и ограничения, связанные с размерами детали. При реализации этого способа используются те же электронно-лучевые пушки, что и для вакуумной ЭЛС. После выхода из электронно-лучевой пушки луч проходит через область высокого давления и входит в область атмосферного давления. В последовательно соединенных камерах происходит падение давления.

На рис. 4.10 показана установка NV-EBW 25-175 TU компании «PTR Praezisionstechnik GmbH». Она имеет много общего с установками для ЭЛС в вакууме и состоит из высоковольтного источника с рабочим напряжением 175 кВ и электронной пушки с максимальным током луча 140 мА. Вывод луча в атмосферу осуществляется с помощью трехступенчатой системы откачки, причем в выходную ступень пушки подается гелий для уменьшения рассеяния луча. Перемещение свариваемых деталей осуществляется с помощью координатного стола с числовым программным управлением компании «Siemens». Для выполнения вспомогательных операций в состав установки входит промышленный робот компании «Kuka». Технические характеристики установки следующие:

Рабочее напряжение	175 кВ
Максимальный ток луча	140 мА
Размеры стола	800×1200 мм
Ход стола вдоль координаты X(Y)	3000 (800) мм
Вертикальный ход пушки вдоль оси Z	1200 мм
Угол наклона пушки	0—90°
Максимальная скорость сварки	20 м/мин

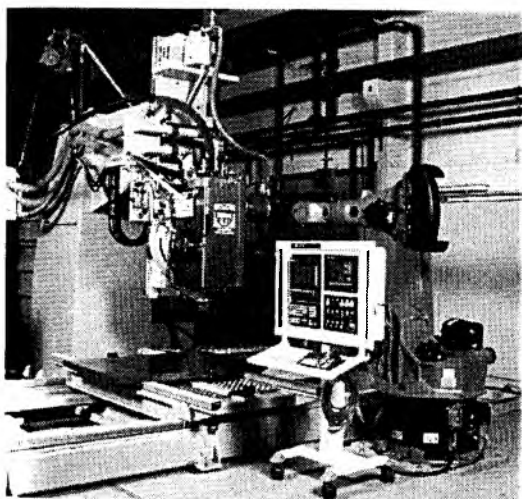


Рис. 4.10. Установка NV-EBW 25-175 TU для ЭЛС в воздухе

С повышением внешнего давления электронный луч из-за столкновения с молекулами газа рассеивается и диаметр его увеличивается. В воздухе луч сохраняет необходимую плотность энергии только на очень коротком рабочем расстоянии (приблизительно 25 мм), которое не следует превышать в процессе сварки (рис. 4.11).

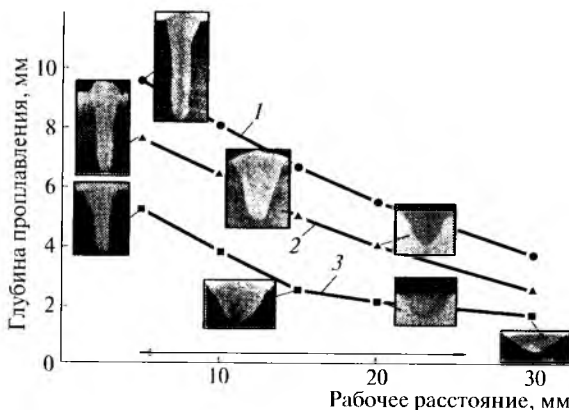


Рис. 4.11. Зависимость глубины проплавления от рабочего расстояния на нержавеющей стали при скорости сварки 5 м/мин и изменяющемся рабочем токе:

1 — 140 мА; 2 — 100 мА; 3 — 60 мА

При безвакуумной ЭЛС наличие довольно большого по сравнению с вакуумной ЭЛС фокусного пятна обеспечивает высокое качество сварки по зазору, допускает относительно грубую разделку кромок и использование присадочного материала (рис. 4.12).

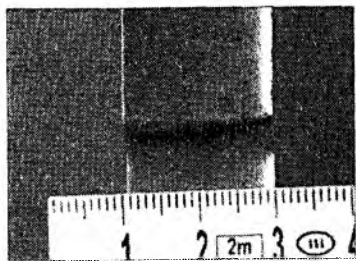


Рис. 4.12. Конфигурация стыка заготовок перед ЭЛС на воздухе

4.3. Сварка лазером

Лазер, или оптический квантовый генератор (ОКГ), создает мощный импульс монохроматического излучения за счет возбуждения атомов примеси в кристалле (рубин) или газах. Если ОКГ построен на полупроводниках, то, используя электрическое возбуждение вместо оптического, можно существенно повысить КПД источника энергии. Этот источник энергии высокой концентрации нашел применение в технике связи и в промышленности для обработки металлов и других материалов (рис. 4.13, а).

Сущность процесса получения мощного потока световых квантов заключается в том, что атомы вещества, которые могут находиться в стабильных и возбужденных состояниях, при переходе из возбужденного состояния в стабильное отдают энергию возбуждения в виде квантов лучистой энергии.

Возбуждение атомов примесей наиболее часто осуществляется в результате поглощения лучистой энергии (лампы накачки). Атом может переходить из возбужденного состояния в стабильное не сразу, а отдельными ступенями. Если эти ступени близки, то переход происходит без излучения кванта энергии, а за счет перераспределения энергии электронов внутри атома.

Некоторые промежуточные ступени — уровни возбуждения — обладают повышенной устойчивостью.

Схема работы ОКГ представлена на рис. 4.13, б. Здесь атомы какого-либо элемента возбуждаются непрерывным источником энергии — лампой накачки — и электроны, возбуждаясь, переходят на уровень энергии 1, но вместо того, чтобы сразу возвращаться на уровень 0, они переходят без излучения на метастабильный уровень 2, а после накопления на этом уровне энергии электронов у значительного числа атомов примеси они все сразу (индукционный период) переходят в исходное состояние на уровень энергии 0, создавая мощное излучение.

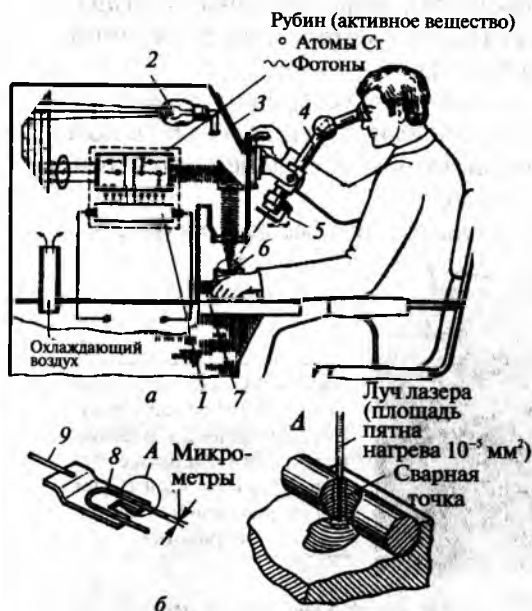


Рис. 4.13. Установка для сварки лазером (а) и схема образования соединения при лазерной сварке (б):

1 — газоразрядная импульсная лампа; 2 — осветитель (фокусировка луча по месту сварки); 3 — пульт управления; 4 — микроскоп; 5 — шторка; 6 — свариваемые детали; 7 — манипулятор (настройка расположения детали относительно луча); 8, 9 — свариваемые детали

Кристалл ограничен строго параллельными гранями, из которых одна непроницаема для света (закрита слоем металла), а другая полупроницаема и пропускает излучение определенной длины волны. Энергия возбуждения от лампы подается перпендикулярно оси кристалла и оси излучения. Выходящие монохроматические лучи фокусируются оптическими системами. Энергия потока квантов (фотонов), направленного на поверхность твердого тела, трансформируется в тепловую, и

температура твердого тела резко возрастает вследствие того, что поток фотонов обладает очень высокой концентрацией энергии. Сварка лазером не требует вакуума и ведется в импульсном режиме, так как при постоянном притоке энергии произойдет разогрев кристалла рубина.

Режим сварки регулируется: частотой, длительностью импульса и степенью расфокусирования луча лазера до плотности энергии, необходимой для сварки изделия. В этом виде сварки коэффициент использования подаваемой мощности очень невысок (1–1,5 %), но соединение ряда изделий можно осуществить только таким образом (например, неметаллические материалы). Кроме того, поток фотонов можно применять для прошивки отверстий в самых твердых материалах, резки металлов и их поверхностной обработки.

Для сварки часто используют установки с искусственным рубином — монокристаллами корунда Al_2O_3 , в котором небольшое число атомов алюминия Al заменено атомами хрома Cr, служащего излучателем.

Наиболее мощными являются газовые лазеры (рис. 4.14).

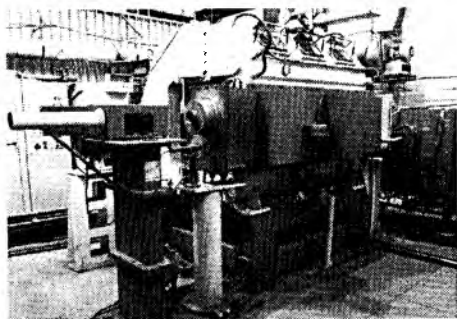


Рис. 4.14. Технологический лазер ЛТ-104 разработки ИЭС им. Е.О. Патона с мощностью излучения 8 кВт на смеси газов $CO_2 + N_2 + He$, применяемый для сварки, наплавки и термообработки

В промышленности лазеры наиболее часто используются для резки. На рис. 4.15 показана твердотельная лазерная машина из серии лазеров МЛЗ с относительно небольшой мощностью — от 250 до 1000 Вт. Установки данной серии предназначены для резки и точного раскроя по сложному контуру листовых материалов — стали (4–6 мм), алюминия (3–4 мм), титана, меди, латуни и др.

В последние годы освоены новые сферы применения лазерной сварки — для соединения полимеров и наплавки под водой.

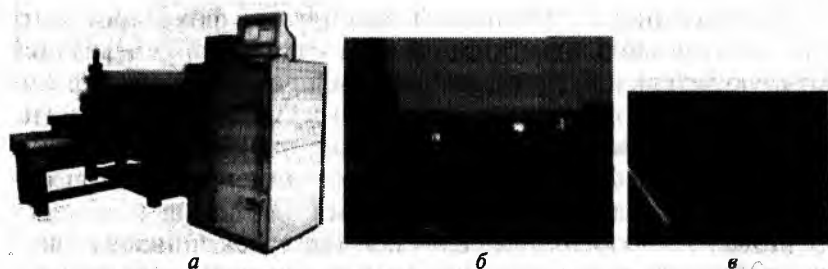


Рис. 4.15. Лазерная установка серии МЛЗ для раскроя листовых материалов:
а и б — общий вид установки; в — примеры вырезаемых деталей

Лазерная сварка полимеров по технологии, разработанной швейцарской компанией Leister Process Technologies, не требует использования специального дорогостоящего оборудования.

Суть этой технологии (рис. 4.16, а) состоит в том, что одна из соединяемых полимерных деталей прозрачна для лазерного луча, а другая непрозрачна. Лазерный луч, проникая через прозрачную деталь, поглощается непрозрачной деталью, и теплота расплавляет зону будущего соединения в прозрачной детали. При этом на обе детали действуют внешнее сжимающее давлением и внутреннее давление, возникающее при нагреве и расширении деталей. Объем расплава распределяется в пропорции: $\frac{2}{3}$ в непрозрачной детали и $\frac{1}{3}$ в прозрачной. Так можно сваривать практически все термопласты и эластомеры.

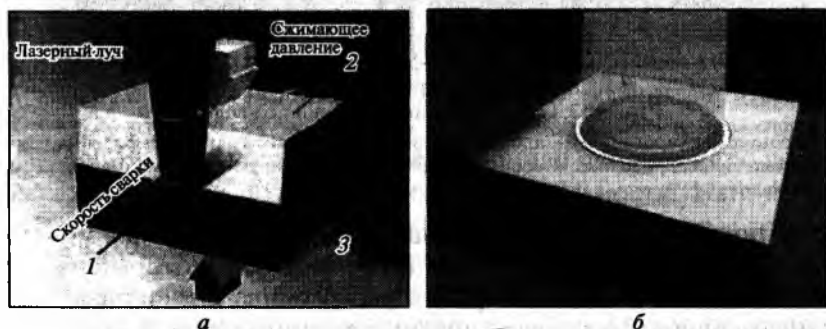


Рис. 4.16. Схема сварки пластмасс проникающим (а) и кольцевым (б) лазерным лучом:

1 — зона плавления; 2 — свариваемая прозрачная часть; 3 — свариваемая непрозрачная часть

Программируя длительность, мощность и фокусировку лазерного луча вдоль траектории движения при сварке через прозрачную деталь или применяя маску с прозрачными местами, можно сваривать или паять сложные трехмерные изделия. Используя при этом контурный лазерный луч, например кольцевой (рис. 4.16, б), можно получать соединение практически мгновенно (за один короткий импульс).

Новая технология идеально подходит для производственных роботизированных линий сварки или пайки. Появляется возможность производить довольно дешевые декоративные детали, например автомобильные фары с аэродинамическим дизайном, а также некоторые изделия для текстильной промышленности и производства упаковки.

Лазерная наплавка под водой. В атомной промышленности значительную проблему создают коррозионные растрескивания внутрикорпусных устройств ядерного реактора, обусловленные тремя факторами: склонностью конструкционного материала к коррозионному растрескиванию, наличием коррозионной среды и растягивающих напряжений.

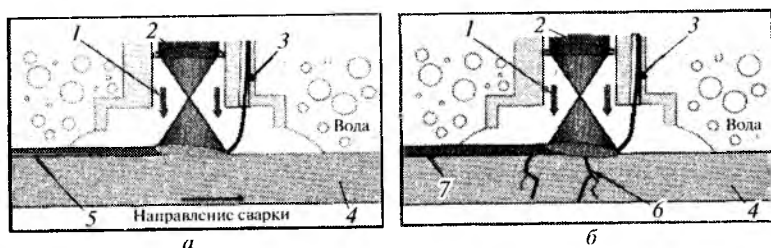


Рис. 4.17. Схема лазерной наплавки под водой:

а — процесс плакирования; б — процесс пайки; 1 — защитный газ Ar ; 2 — лазерный пучок; 3 — присадочная проволока; 4 — основной металл; 5 — плакирующий слой; 6 — трещина; 7 — паяный шов

С помощью лазерной наплавки на основной металл можно наносить плакирующий слой (рис. 4.17, а), который будет обеспечивать стойкость против растрескивания, а также запаивать небольшие поверхностные трещины (рис. 4.17, б). На основной металл наплавляется коррозионно-стойкий слой, который повышает стойкость основного металла против коррозионного растрескивания. При этом возможно запаивание поверхностных трещин глубиной 0,5 мм. Швы (наплавки)

можно выполнять на глубине 30 м при изменяющейся геометрии.

Преимуществами лазерной сварки (наплавки) под водой являются:

- ♦ компактность сварочной головки, подходящей для различной геометрии;
- ♦ малое количество теплоты, подводимой к основному металлу: 1–3 кДж/см, что составляет примерно 10 % количества теплоты, подводимой при стандартной дуговой сварке ТИГ;
- ♦ отсутствие влияния процесса на чувствительность окружающего металла к коррозионному растрескиванию;
- ♦ возможность запаивания неглубоких трещин, что может исключить необходимость дорогостоящего ремонта аппаратного обеспечения или его замены;
- ♦ возможность размещения лазерного блока далеко от места работы (300 м).

4.4. Лазерно-дуговая сварка

В последнее время большое распространение получают гибридные или комбинированные технологические процессы, реализуемые путем совместного использования двух различных источников теплоты, в частности лазерного пучка и электрической дуги.

Первые исследования лазерно-дуговых процессов, выполненные во второй половине 1970-х гг. в Великобритании, показали, что эти процессы обладают рядом особенностей, которые нельзя объяснить простой суперпозицией свойств используемых источников теплоты, взятых по отдельности. Например, при этом способе воздействия на металл существенно увеличивается коэффициент использования энергии как лазерного источника теплоты, так и дугового, повышается стабильность движения пятна дуги по поверхности изделия, что позволяет значительно увеличить глубину проплавления при использовании лазеров небольшой мощности, а также повысить стабильность и практически удвоить производительность дугового процесса.

Существуют гибридный и комбинированный способы сварки.

Гибридная сварка — такой способ сварки, при котором лазерное излучение и электрическая дуга действуют совместно на одну точку, и физическая сущность такого действия отличается от действия каждого из примененных видов сварки.

При гибридной (рис. 4.18, а) сварке синергетический эффект от совместного использования лазерного излучения и электрической дуги вызван переходом от теплопроводного режима сварки в режим глубокого (кинжального) проплавления. При этом используют сравнительно маломощные лазерные и дуговые источники, ни у одного из которых в отдельности не хватает мощности для достижения сквозного проплавления металла (обычно тонколистового). В случае их комбинации электрическая дуга «привязывается» к месту действия лазерного излучения на изделие (анод) и сжимается в пределах факела лазерной плазмы. При этом устраняется эффект блуждания анодного пятна. Благодаря дополнительному энерго вкладу дуги, стабилизированной лазерным излучением, а также увеличению поглощательной способности перегретого металла режим проплавления от теплопроводного переходит в кинжальный. При этом возникает характерный для лазерной сварки пародинамический канал, в который, следуя за лазерным излучением и образуемой им из паров металла плазмой, опускается анодная область столба сжатой дуги. Как только преодолевается порог между теплопроводным и кинжальными режимами проплавления, объем переплавленного металла резко возрастает, что позволяет увеличить глубину провара или скорость сварки в 1,5–2,0 раза.

Комбинированная сварка — способ сварки, при котором лазерное излучение и дуга создают единый термический цикл процесса, однако физическая сущность действия каждой из составляющих процесса остается самостоятельной.

Комбинированную сварку применяют при сварке металла большой толщины, а именно лазерно-дуговую с использованием дуги, горящей между плавящимся электродом и изделием (рис. 4.18, б). Разделка шва выполняется так, чтобы с помощью лазерного излучения производилась заварка корневого шва и заполнение разделки металлом плавящегося электрода. При этом, изменяя расстояние a между зонами действия лазерного

излучения и дуги (см. рис. 4.18, б), можно подобрать такой общий сварочный термический цикл, при котором устраняются негативные последствия лазерной сварки. Например, при стыковой сварке листов стали толщиной 20 мм с V-образной разделкой кромок при мощности лазера 6,3 кВт, мощности дуги 18,55 кВт происходит нормализация корневого шва и достигается однородное распределение твердости между основным металлом и металлом шва.

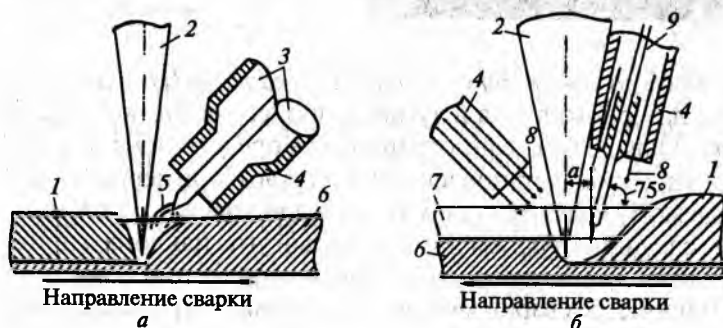


Рис. 4.18. Схема процессов лазерно-дуговой сварки:

а — при использовании дуги с неплавящимся электродом; б — при использовании дуги, горящей на плавящемся электроде; 1 — шов; 2 — лазерный пучок; 3 — неплавящийся электрод; 4 — сопло; 5 — дуга; 6 — изделие; 7 — разделка; 8 — защитный газ; 9 — электродная проволока; а — расстояние между ис-

При гибридной лазерно-плазменной сварке обрабатываемых изделий лазерный пучок и плазменная струя соединяются в области, расположенной близко к обрабатываемому изделию (рис. 4.19). Во время работы плазменная горелка находится под углом около 45° к лазерному пучку. Основная дуга зажигается посредством низкоамперной вспомогательной дуги, сформировавшейся между концом электрода и соплом. После зажигания вспомогательная дуга вырабатывает достаточное количество теплоты для ионизации воздушного зазора между соплом и обрабатываемым изделием. Вольфрамовый электрод размещен за соплом, которое обеспечивает характерное струйное воздействие плазмообразующего газа. Стабильность функционирования плазменной горелки поддерживается довольно продолжительное время, поскольку конец электрода не подвергается окислению.

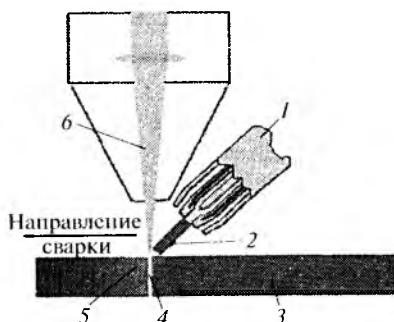
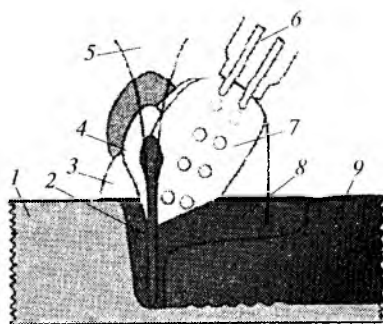


Рис. 4.19. Схема сварки плазменной дугой, дополненной лазером:

1 – плазменная горелка; 2 – плазменная дуга; 3 – обрабатываемое изделие; 4 – парогазовый канал; 5 – сварочная ванна; 6 – лазерный пучок

Способ *лазерная тандем-сварка + сварка МИГ* является сочетанием лазерного пучка и дуговых процессов только с одной зоной расплава. Схема данного процесса представлена на рис. 4.20. Лазерный пучок, установленный под углом примерно 90° к обрабатываемому изделию, используется для заварки корня шва. Обе другие следящие дуги имеют некоторый угол наклона и применяются также для заварки корня шва и заполнения разделки кромок. В процессе сварки можно устанавливать три различные выходные мощности в зависимости от желаемого результата. При соответствующей выходной мощности для тандем-сварки можно выбрать геометрию соединения, желаемое заполнение соединений и скорость сварки. Изменение скорости сварки, диаметра фокальной точки и мощности лазерного излучения при подготовке скоса кромки позволяет изменять глубину шва. Для получения желаемых свойств металла шва используют два присадочных материала разных химических составов.



Направление сварки

Рис. 4.20. Схема лазерной тандем-сварки:

1 – обрабатываемое изделие; 2 – парогазовый канал; 3 – облако защитного газа; 4 – индуцированная лазером плазма; 5 – лазерный пучок; 6 – электрод; 7 – дуга; 8 – наплавленный валик; 9 – сварочная ванна

Чтобы изменить геометрию и структуру шва, воздействуют на параметры процесса. Дуговые способы сварки обеспечивают заполнение разделки с помощью присадочного металла, что также определяет ширину шва.

Преимуществом комбинированных процессов является то, что при расплавлении присадочного металла давление дуги не влияет на обрабатываемое изделие. При гибридной сварке лазерная тандем-сварка + сварка МИГ есть возможность отдельно контролировать мощность лазерного излучения, а также мощность дуги и ее длину, что облегчает отрыв капли, повышает стабильность дуги и способствует незначительному разбрызгиванию. Вместе с этим способом сварки можно использовать гибридную лазерную сварку МИГ/МАГ одной дугой. Применение процесса гибридной лазерной тандем-сварки + сварки МИГ/МАГ при соединении труб из конструкционной стали с толщиной стенки 8 мм и внутренним диаметром 500 мм, что соответствует стандарту EN 10149-2, позволило при V-образной подготовке кромок получать швы с полным проплавлением.

При гибридной лазерной сварке + сварке МИГ/МАГ металла толщиной более 12 мм следует принимать меры для предупреждения порообразования в корне шва. Опасность образования пор связана с недостаточной способностью глубоких и узких лазерных швов к дегазации металла. Чтобы предотвратить поры, сварочную ванну необходимо удерживать на протяжении длительного времени. Это достигается применением *гибридной лазерной дуговой сварки под флюсом*, при которой создаются благоприятные условия для дегазации. Здесь оба процесса сварки действуют в одной рабочей зоне на довольно близком расстоянии (13–15 мм).

При объединении процессов сварки лазерным пучком и дуговой сварки под флюсом в одной рабочей зоне флюс попадал в парогазовый канал лазерного пучка, а лазерное излучение поглощалось флюсом, а не металлом. Такому «выпадению» флюса препятствует устройство, ключевым звеном которого является разделительная пластина, установленная между лазерным пучком и устройством подачи флюса (рис. 4.21). Расстояние между двумя процессами, разделяющее шов на две области — сваренную лазером и дуговой сваркой под флюсом, должно

быть довольно коротким для обеспечения выпадения минимального количества флюса, однако достаточным, чтобы шлак в начале процесса не зажимал свариваемый лист. Если угол наклона разделительной пластины слишком большой, то разделительная пластина может быть захвачена лазерным пучком, а если он слишком мал, то дуга может гореть между разделительной пластиной и присадочной проволокой. В этих областях отсутствует перемешивание металла шва. Именно предварительный нагрев лазерным пучком приводит к синергетическому эффекту, который увеличивает скорость процесса дуговой сварки под флюсом.

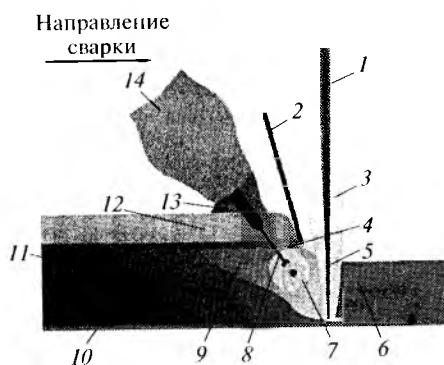


Рис. 4.21. Схема гибридной лазерно-дуговой сварки под флюсом:

1 – лазерный пучок; 2 – разделительная пластина; 3 – плазмоиспарение металла; 4 – жидкий шлак; 5 – парогазовый канал; 6 – основной металл; 7 – раковина в дуговом шве; 8 – электродная проволока для дуговой сварки под флюсом; 9 – расплавленная ванна; 10 – металл шва; 11 – твердый шлак; 12 – флюс; 13 – мундштук; 14 – бункер для флюса

Способ гибридной лазерно-дуговой сварки под флюсом нашел практическое применение для соединений металлов большой толщины с изменяющимся зазором в кромках благодаря использованию менее дорогостоящих источников лазерного излучения – твердотельных лазеров.

В процессе сварки достигается лучшая, чем при лазерной сварке, дегазация за счет покрытия расплавленного металла шлаком, хорошего заполнения шва.

Производительность этого способа сварки можно повысить, увеличив скорость сварки, которая для листового материала может составлять до 40 % скорости, достигаемой при лазерной сварке.

При использовании гибридной сварки расходы на источник лазерного излучения значительно уменьшаются, а затраты на электроэнергию становятся намного выше.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что служит источником теплоты, используемой для расплавления основного и присадочного металлов при электрошлаковой сварке?
2. По каким схемам выполняется процесс электрошлаковой сварки?
3. Какие функции выполняет флюс при электрошлаковой сварке?
4. Металл какой толщины можно соединить электрошлаковой сваркой?
5. В чем сущность процесса электронно-лучевой сварки? Назовите ее достоинства и недостатки.
6. Где и для какого типа соединений используется точечная сварка?
7. В чем сущность процесса точечной сварки?
8. Чем отличается шовная сварка от точечной?
9. Что общего между точечным, шовным и рельефным видами сварки?
10. Какие способы стыковой сварки вы знаете?
11. Чем отличается стыковая сварка сопротивлением от стыковой сварки оплавлением?

ГЛАВА 5 СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ

5.1. Контактная сварка

Контактная сварка объединяет большую группу способов сварки, из которых наиболее распространены точечная, шовная и стыковая.

Точечная сварка. Основным типом соединения при точечной сварке является нахлесточное. Свариваемые детали 1 (рис. 5.1) собирают внахлестку и зажимают усилием $F_{св}$ между двумя электродами 3, подводящими ток большой силы (до нескольких десятков килоампер) к месту сварки от источника электрической энергии 4 невысокого напряжения (обычно 3–8 В). Детали нагреваются кратковременным (0,01–0,5 с) импульсом тока до появления расплавленного металла в зоне контакта 5. Нагрев сопровождается пластической деформацией металла и образованием уплотняющего пояска 2, предохраняющего жидкий металл от выплеска и взаимодействия с воздухом.

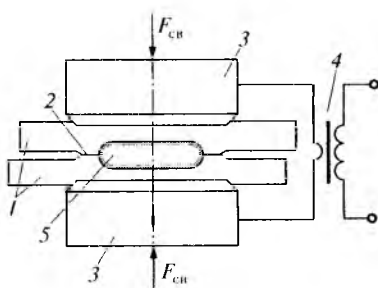


Рис. 5.1. Схема точечной сварки

Теплота, используемая при сварке, зависит от сопротивления между электродами и выделяется при протекании тока не посредственно в деталях, контактах между ними и контактах деталей с электродами. Сопротивления самих электродов должны быть незначительны, так как выделяющаяся в них теп-

лота не участвует в процессе сварки. Поэтому используются электроды относительно большого сечения из материала, обладающего большой электрической проводимостью и теплопроводностью. Электроды для точечной сварки изготавливают главным образом из меди и ее сплавов.

Машины контактной сварки (рис. 5.2), используемые для осуществления процесса точечной сварки, в процессе работы выполняют две основные функции — сжатие и нагрев соединяемых деталей. В конструкции машины условно можно выделить механическое и электрическое устройства.

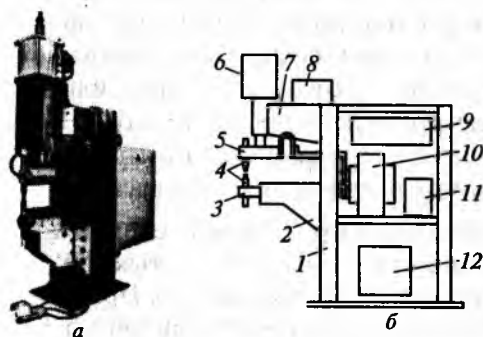


Рис. 5.2. Общий вид машины точечной сварки (а) и ее основные узлы (б)

Основной частью механического устройства машины для точечной сварки (рис. 5.2, б) является корпус 1, на котором закреплены нижний кронштейн 2 с нижней консолью 3 и электрододержателем 4 с электродом и верхний кронштейн 7. Нижний кронштейн 2 обычно выполняют переставным или передвижным (плавно) по высоте, что дает возможность регулировать расстояние между консолями в зависимости от формы и размера свариваемых деталей. На верхнем кронштейне установлен пневмопривод усилия сжатия электродов 6, с которым соединена верхняя консоль 5 с электрододержателем 4. Для управления работой пневмопривода на машине установлена пневмоаппаратура 8. Привод усилия может быть также пневмогидравлическим, гидравлическим и др. Корпус, верхний и нижний кронштейны и консоли воспринимают усилие, развиваемое пневмоприводом, и поэтому должны иметь высокую жесткость.

Электрическая часть машины состоит из сварочного трансформатора 10 с переключателем ступеней 11, контактора 12 и

блока управления 9. Часто аппаратура управления монтируется в отдельном шкафу управления. Контактор 12 подключает сварочный трансформатор к электрической питающей сети и отключает его. К электрическому устройству, предназначенному для обеспечения необходимого цикла нагрева металла в зоне сварки, относится также вторичный контур машины, который образуют токоподводы, идущие от трансформатора к свариваемым деталям. Ток от трансформатора через жесткие и гибкие шины подводится к верхней 5 и нижней 3 консолям с электрододержателями 4. Консоли и электрододержатели с электродами участвуют в передаче сварочного тока и усилия, поэтому являются частями одновременно электрического и механического устройств машины. Все части вторичного контура изготовляют из меди или медных сплавов с высокой электрической проводимостью. Большинство элементов вторичного контура, сварочный трансформатор и контактор имеют внутреннее водяное охлаждение.

Шовная сварка. При шовной сварке детали соединяются швом, состоящим из отдельных сварных точек (литых зон), перекрывающих или не перекрывающих одна другую. При сварке с перекрытием точек получается герметичный шов (рис. 5.3, а), а при сварке без перекрытия шов практически не отличается от ряда точек, полученных при точечной сварке.

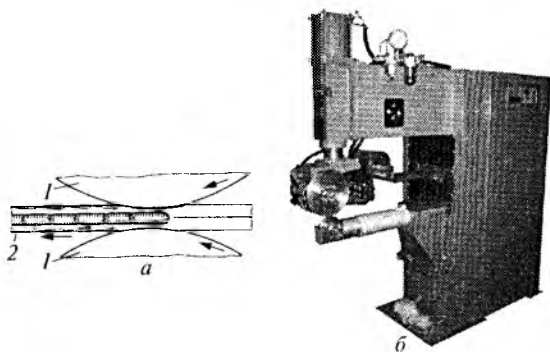


Рис. 5.3. Схема процесса (а) и машина шовной сварки МШ-3208 (б)

Особенность шовной сварки состоит в том, что она выполняется с помощью двух (или одного) вращающихся дисковых электродов-роликов 1, между которыми с усилием сжаты и прокатываются соединяемые детали 2 (рис. 5.3, а). К роликам

подводится сварочный ток, который, как при точечной сварке, нагревает и расплавляет металл в месте соединения.

Шовная сварка, выполняемая при непрерывном движении деталей и непрерывном протекании сварочного тока, называется непрерывной шовной сваркой. Такую сварку редко применяют из-за сильного перегрева поверхности деталей, контактирующей с роликами. Больше распространена прерывистая шовная сварка, при которой детали перемещаются непрерывно, а ток включается и выключается на определенные промежутки времени и при каждом включении (импульсе) тока образуется единичная литая зона. Перекрытие литых зон, необходимое для герметичности шва, достигается при определенном соотношении скорости вращения роликов и частоты импульсов тока. Применяют также шаговую сварку, при которой детали перемещаются прерывисто (на шаг), а сварочный ток включается только во время их остановки, благодаря чему охлаждение металла в контактах ролик — деталь лучше, чем при непрерывном движении свариваемых деталей. В большинстве случаев шовная сварка производится с наружным водяным охлаждением, что снижает перегрев внешних слоев металла.

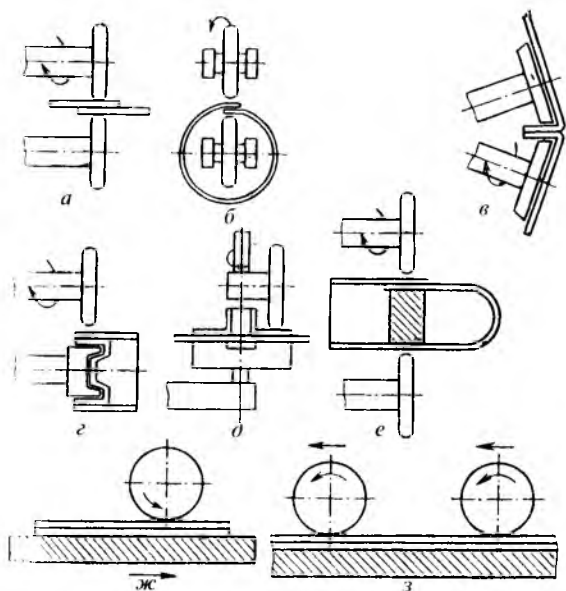


Рис. 5.4. Способы шовной сварки

Разнообразные виды шовной сварки, используемые на практике, в основном различаются способом подвода сварочного тока (односторонний или двусторонний) и расположением роликов относительно свариваемых деталей (рис. 5.4). Двусторонняя шовная сварка аналогична двусторонней точечной (рис. 5.4, *а–е*). Вместо одного из роликов можно применить оправку, плотно контактирующую с внутренней деталью (рис. 5.4, *з*). Для сварки неподвижных деталей кольцевым швом на плоскости используется верхний ролик, вращающийся вокруг своей оси, а также вокруг оси шва (рис. 5.4, *д*). Нижняя деталь контактирует с электродом, имеющим форму чашки. Иногда свариваемые детали устанавливают на медную шину, при этом подвод тока может быть двусторонний или односторонний. При сварке на шине возможны варианты подвижной (рис. 5.4, *ж*) и неподвижной шин, когда два ролика, к которым подведен ток, вращаются вокруг своих осей и катятся по деталям (рис. 5.4, *з*). При односторонней шовной сварке, как и при точечной, наблюдается шунтирование тока в деталь, контактирующую с роликами.

Рельефная сварка. Рельефная сварка аналогична точечной сварке, при которой детали обычно соединяются одновременно в нескольких точках. Положение этих точек определяется выступами – рельефами, образованными (штамповкой, обработкой резанием) на одной детали или обеих. При рельефной сварке контакт между деталями определяется формой их поверхности в месте соединения, а не формой рабочей части электродов, как при точечной сварке.

Процессы образования соединения при рельефной сварке и точечной имеют много общего. Две детали 2 из листа, на одной из которых выштампованы рельефы сферической формы, зажимаются между электродами 1 с большой контактной поверхностью (плитами), подводящими ток к соединяемым деталям (рис. 5.5, *а*). Для обеспечения одинаковых условий нагрева каждого рельефа необходимо, чтобы приложенное усилие $F_{\text{дл}}$ и ток I_2 (рис. 5.5, *б*) равномерно распределялись между всеми точками контакта деталей ($F_{\text{св}}$, $I_{\text{св}}$).

Процесс образования соединения состоит в следующем. При сжатии деталей электродами из-за малой площади кон-

такта рельефа с плоской деталью (рис. 5.5, *а*) контактное сопротивление деталь — деталь при рельефной сварке больше, чем при точечной сварке того же металла. После включения сварочного тока металл рельефа интенсивно нагревается и его вершина деформируется, контактное сопротивление быстро уменьшается и теплота выделяется в основном за счет собственного сопротивления металла рельефа. Нагреваемые рельефы не должны сильно деформироваться до образования зоны расплавления в контакте деталей. Если это произойдет, то детали придут в соприкосновение по всей их внутренней поверхности, ток потечет, минуя рельефы, через холодные участки металла с малым сопротивлением, дальнейший нагрев рельефа резко уменьшится и соединение будет непрочным.

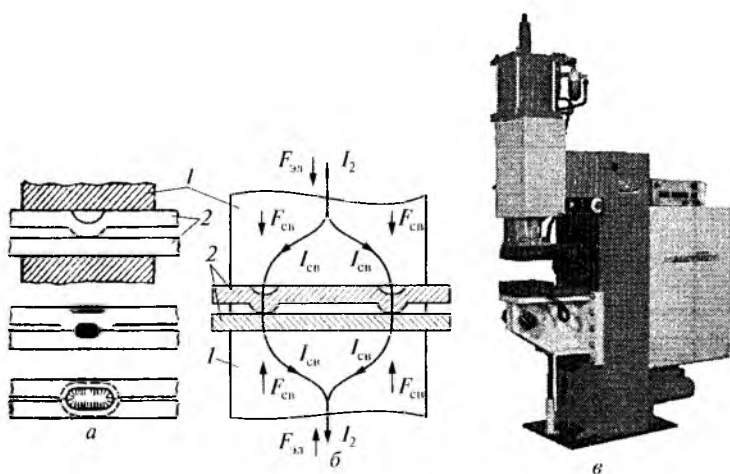


Рис. 5.5. Рельефная сварка:

а — последовательность образования соединения; *б* — распределение токов и усилий; *в* — общий вид машины МР-8010

Если режим сварки выбран правильно, то в результате теплового расширения металла в зоне соединения между деталями образуется зазор, препятствующий их случайному соприкосновению и появлению дополнительных (помимо рельефа) путей протекания тока через детали. При протекании тока зона расплавления увеличивается в объеме, металл рельефа интен-

сивно деформируется и выходит на наружную поверхность детали (остается лишь небольшая кольцевая канавка). Когда зона расплавления достигнет необходимых размеров, сварочный ток выключают, металл охлаждается и кристаллизуется, при этом образуется литое ядро. Как и при точечной сварке, литое ядро окружает плотный поясок металла, по которому соединение произошло без расплавления.

Точечная микросварка. Разновидностью контактной сварки является точечная микросварка, используемая при соединении с помощью разряда конденсаторов навесных электрорадиоэлементов с токоведущими дорожками печатных плат. Для сварки используется машина (рис. 5.6) – комплекс, состоящий из монтажного стола, сварочной головки, сварочного трансформатора, предметного столика, источника питания и микроскопа МБС-10.

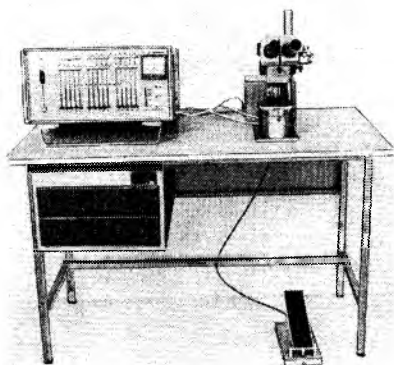


Рис. 5.6. Машина для контактной точечной микросварки

Сварочная головка, снабженная гибким педальным приводом, представляет собой механизм для опускания и прижима к свариваемому изделию двух электродов с отдельным приложением усилия и регулируемым параллельным зазором между ними.

Свариваемые детали размещаются на предметном столике, горизонтальная рабочая площадка которого имеет только вертикальное перемещение, регулируемое лимбом для установки гарантированного рабочего хода пружинных подвесок.

Источник питания типа И153 или И153.01 соединен проводами со сварочным трансформатором и микропереключате-

лем, установленным в сварочной головке, и обеспечивает: зарядку рабочих конденсаторов до уровня напряжения, определяемого технологией сварки; поддержание этого напряжения с заданной точностью; последующий разряд рабочих конденсаторов на сварочный трансформатор.

Стыковая сварка. При стыковой сварке детали соединяются (свариваются) по всей плоскости их касания под воздействием нагрева и сжимающего усилия. Детали одинакового или близкого по размерам сечения закрепляют в электродах-губках машины, к которым подводят ток (рис. 5.7). При нагреве и пластической деформации металла в зоне стыка часть элементарных частиц — зерен металла разрушается и одновременно образуются новые (общие для обеих деталей) зерна. Обязательным условием получения надежного соединения является удаление пленки оксидов с торцов деталей или ее разрушение. Для сварки используется теплота, выделяемая в контакте между горцами соединяемых деталей (за счет контактного сопротивления) и в самих деталях, имеющих собственное сопротивление. При стыковой сварке переходные сопротивления губка—деталь весьма малы и практически не оказывают влияния на общее количество теплоты.

В стыковой сварке различают сварку сопротивлением и сварку оплавлением.

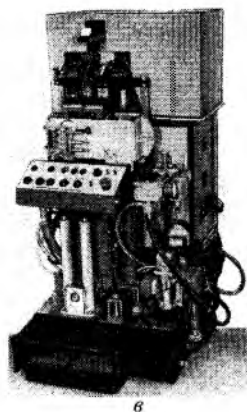
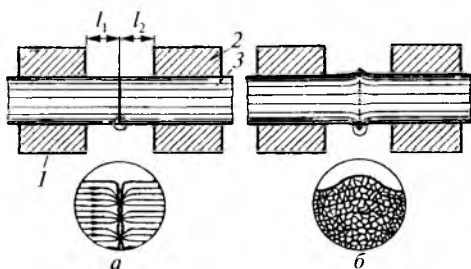


Рис. 5.7. Схема процесса стыковой сварки сопротивлением (а, б) и общий вид машины стыковой сварки К826 (в)

Сварка сопротивлением — способ стыковой сварки, при котором ток включается после сжатия деталей 3 усилием, передаваемым губками машины 1, 2 (рис. 5.7, а). В начале процесса детали контактируют только по отдельным выступам, что создает контактное сопротивление. После включения тока металл зоны контакта деталей интенсивно нагревается вследствие высокой плотности тока на выступах и под действием усилия выступы сминаются. Контактное сопротивление быстро уменьшается, далее нагрев происходит за счет собственного сопротивления деталей, которое увеличивается с повышением температуры. Когда температура в зоне контакта станет близкой к температуре плавления металла, детали под действием усилия свариваются в результате рекристаллизации с образованием плавного утолщения — усиления (рис. 5.7, б).

При стыковой сварке важной характеристикой процесса является вылет деталей из губок — установочная длина l_1 и l_2 (см. рис. 5.7, а). В связи с тем что губки интенсивно отводят теплоту, температура в зоне стыка деталей и соответственно качество сварки существенно зависят от установочной длины. При стыковой сварке сопротивлением для сжатия деталей используют постоянное или резко возрастающее к концу нагрева усилие, которое снимают после выключения тока.

Сварка оплавлением — способ стыковой сварки, при котором торцы соединяемых деталей нагревают током до расплавления металла при их сближении, которое осуществляется под действием небольшого усилия, и затем быстро сжимают детали осадкой. При сварке оплавлением зажатые в губках детали, к которым подведено напряжение, медленно перемещают навстречу одна другой с постоянной или возрастающей скоростью до соприкосновения торцов. Вследствие небольшой начальной площади контакта деталей в месте их соприкосновения создается высокая плотность тока, металл контакта мгновенно нагревается до температуры кипения и испаряется, что сопровождается небольшим взрывом единичных контактов-перемычек. В результате взрыва часть металла перемычек выбрасывается из стыка в виде искр и брызг металла. Так, при сближении деталей непрерывно возникают и разрушаются контакты-перемычки с выбросом частиц и паров металла и образованием на торцах равномерного расплавленного слоя ме

талла (рис. 5.8, *а*). При этом процессе, называемом оплавлением, уменьшается установочная длина деталей.

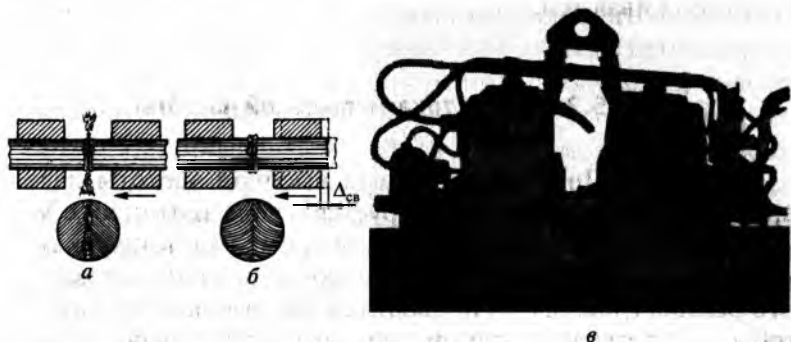


Рис. 5.8. Схема процесса (*а*, *б*) и машина для стыковой сварки оплавлением рельс (*в*)

К концу процесса оплавления контактное сопротивление уменьшается вследствие увеличения числа перемычек, а собственное сопротивление деталей повышается с нагревом металла, поэтому общее сопротивление металла между губками изменяется незначительно. Во время оплавления контактное сопротивление значительно больше сопротивления деталей, поэтому нагрев в основном происходит за счет теплоты, выделяющейся в металле торцов деталей. Удаленные от торцов слои металла нагреваются вследствие теплопроводности от оплавляемых поверхностей. После определенного укорочения деталей оплавлением их быстро сжимают нарастающим усилием — осадкой. При осадке расплавленный и перегретый металл с оксидами выдавливается из стыка деталей, образуя сварное соединение, а металл околостыковой зоны деформируется с характерным искривлением волокон, образуя усиление и грат в виде окисленного и перегоревшего металла (рис. 5.8, *б*). В процессе оплавления и осадки существенно уменьшается установочная длина на величину припуска на сварку $\Delta_{\text{св}}$.

Для соединения деталей больших сечений с целью снижения электрической и механической мощности оборудования используют сварку оплавлением с подогревом, при которой концы деталей вначале нагревают, как при сварке сопротивлением. Детали при подогреве периодически сжимают неболь-

шим усилием, нагревают током, затем размыкают. После подогрева до определенной температуры торцы оплавляются и детали осаживаются.

5.2. Сварка токами высокой частоты

При сварке токами высокой частоты изделие перед сварочным узлом формируется в виде заготовки с V-образной щелью между свариваемыми кромками. К кромкам индуктором (рис. 5.9, а) или с помощью вращающегося контактного ролика (рис. 5.9, б) подводится ток высокой частоты так, чтобы он протекал от одной кромки к другой через место их схождения.

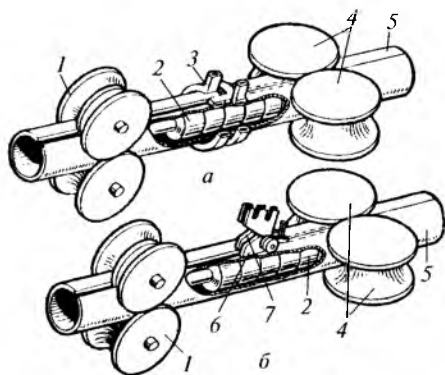


Рис. 5.9. Схема высокочастотной сварки труб с индукционным (а) и контактным (б) способами подвода тока:

1 — направляющий ролик; 2 — ферритовый стержень; 3 — индуктор; 4 — сжимающие ролики; 5 — труба; 6, 7 — контакты

Вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости, который усиливается по мере сближения кромок, достигается высокая концентрация тока в месте схождения кромок и происходит их разогрев. Нагретые кромки обжимаются валками и свариваются. Качество сварного соединения и расход электроэнергии обусловлены особенностями протекания тока высокой частоты по проводникам. При протекании тока по проводнику проявляется поверхностный эффект — неравномерное распределение переменного тока по сечению проводника, когда у наружной поверхности проводника наблюдается наибольшая плотность тока. При высокой частоте ток протекает лишь по тонкому поверхностному слою проводника. Поверх

ностный эффект существенно увеличивает активное сопротивление проводников и позволяет сконцентрировать выделение энергии в поверхностных слоях нагреваемого изделия.

При протекании переменного тока в системе проводников, расположенных так, что каждый из них находится не только в собственном переменном магнитном поле, но и в поле других проводников, проявляется эффект близости, когда плотность тока по периметру проводников в близлежащих точках проводников максимальна, а в наиболее удаленных — минимальна. Чем меньше расстояние между осями проводников и чем больше радиус сечения проводника, тем сильнее проявляется эффект близости.

5.3. Холодная сварка

Холодная сварка — способ соединения деталей при комнатной (и даже отрицательной) температуре без нагрева внешними источниками. Сварка осуществляется с помощью специальных устройств, вызывающих одновременную направленную деформацию предварительно очищенных поверхностей и нарастающее (до определенной границы) напряженное состояние, при котором образуется монолитное высокопрочное соединение.

С помощью холодной сварки можно соединять алюминий, медь, свинец, цинк, никель, серебро, кадмий, железо и т.д. Особенно велико преимущество холодной сварки перед другими способами сварки при соединении разнородных металлов, чувствительных к нагреву или образующих интерметаллиды.

По природе холодная сварка — сложный физико-химический процесс, протекающий только в условиях пластической деформации, роль которой заключается в предельном утонении или удалении слоя оксидов, в сближении свариваемых поверхностей до расстояния, соизмеримого с параметром кристаллической решетки, а также в повышении энергетического уровня поверхностных атомов, обеспечивающем возможность образования химических связей.

Качество сварного соединения определяется исходным физико-химическим состоянием контактных поверхностей, давлением (усилием сжатия) и степенью деформации при сварке, а также схемой деформации и способом приложения давления (статического, вибрационного).

В зависимости от схемы пластической деформации заготовок сварка может быть точечной, шовной и стыковой.

Холодная точечная сварка — наиболее простой и распространенный способ холодной сварки (рис. 5.10). Ее применение рационально для соединения алюминия, алюминия с медью, армирования алюминия медью трудоемкой клепки и контактной точечной сварки.

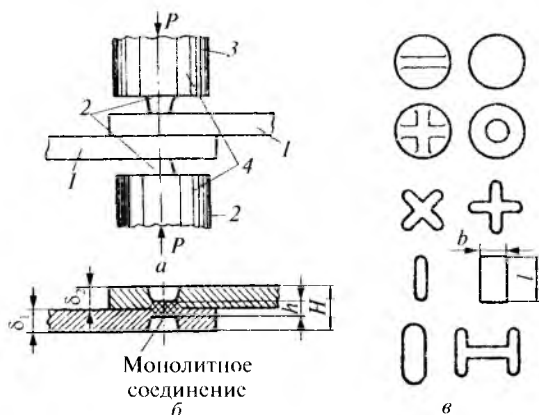


Рис. 5.10. Схема холодной точечной сварки (а), геометрия сварного соединения (б) и применяемые формы пуансонов (в)

При точечной сварке (рис. 5.10, а) зачищенные детали 1 устанавливаются внахлестку между пуансонами 3, имеющими рабочую часть 2 и опорную поверхность 4. Когда пуансоны вдавливают сжимающим усилием P , происходит деформация заготовок и формируется сварное соединение. Опорная часть пуансонов создает дополнительное напряженное состояние в конечный момент сварки, ограничивает глубину погружения пуансонов в металл и уменьшает коробление изделия.

Свариваемые детали 1 предварительно сжимаются прижимами 2 или одновременно с вдавливанием пуансона 3. Наличие зоны обжатия вокруг вдавливаемого пуансона уменьшает коробление деталей, повышает напряженное состояние в зоне сварки, что приводит к периферийному провару за площадью

отпечатка пуансона. Но при этом возникают технические затруднения — необходимость создания двух высоких давлений на малой поверхности и устранения затекания металла между пуансоном и прижимом.

Прочность точек может быть повышена на 10–20 % при сварке по схеме, показанной на рис. 5.11, *а*.

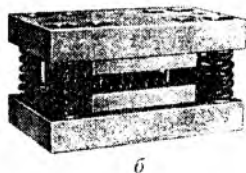
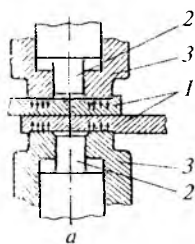


Рис. 5.11. Схема (*а*) и приспособление (*б*) для холодной точечной сварки с предварительным обжатием

Ввиду простоты способа точечной холодной сварки специальные машины для ее выполнения не получили большого развития. Сварку успешно выполняют на самых разных серийных прессах с использованием кондукторов, надежно фиксирующих свариваемые заготовки, чтобы исключить их коробление. На рис. 5.12, *а* показана установка холодной сварки давлением, разработанная Институтом сварки России. С помощью данной установки успешно соединяются алюминий с медью в электротехнике, энергетике, цветной металлургии; соединяют медные контакты проводов; изготавливают кольца из меди и алюминия и проч. (рис. 5.12, *б*).

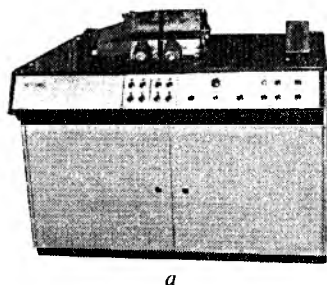


Рис. 5.12. Установка для холодной сварки (*а*) и примеры сваренных деталей (*б*)

Холодная шовная (роликовая) сварка характеризуется непрерывностью монолитного соединения. По механической схеме

эта сварка аналогична холодной сварке прямоугольными пуансонами (рис. 5.13). Собранные заготовки 1 устанавливаются между роликами 2 и сжимаются ими до полного погружения рабочих выступов 3 в металл. Когда ролики приводятся во вращение, они перемещают изделие, последовательно внедряя рабочими выступами в металл, и вызывают его интенсивную деформацию, в результате которой образуется непрерывное монолитное соединение — шов.

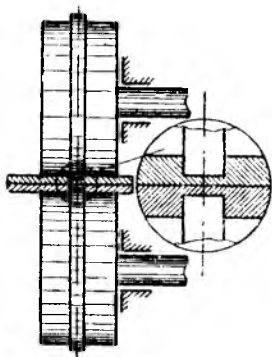


Рис. 5.13. Схема холодной шовной сварки

Шовная сварка бывает:

- ♦ двусторонняя, выполняемая одинаковыми роликами;
- ♦ односторонняя, при которой один ролик имеет выступ высотой, равной сумме высот выступов при двусторонней сварке, а второй является опорным, без рабочего выступа; такая сварка чаще применяется при соединении разнородных металлов с большим различием по твердости, когда рабочая часть ролика вдавливается в более твердый металл, но при прочих равных условиях обеспечивает более прочные швы и при сварке однородных металлов;
- ♦ несимметричная, при которой используются ролики, имеющие различные по размерам, а иногда и по форме рабочие выступы.

При роликовой сварке металл свободно течет вдоль оси шва, что затрудняет создание достаточно напряженного состояния металла в зоне соединения. Поэтому для достижения провара требуется большая пластическая деформация (на 2–6 %), чем при точечной сварке. Чтобы повысить напряженное состояние

в зоне роликовой сварки, увеличивают диаметр роликов. Обычно диаметр ролика близок 50δ , ширина рабочего выступа $(1-1,5)\delta$, высота $(0,8-0,9)\delta$, а ширина опорной части ролика, ограничивающая деформации, в 2–3 раза больше ширины рабочего выступа. Роликовая сварка алюминия толщиной 1,0 мм при свариваемости 27 % выполняется со скоростью до 8–12 м/мин.

Для роликовой сварки используются металлорежущие станки, например фрезерные (рис. 5.14). При сварке тонких пластичных металлов применяются ручные настольные станки.

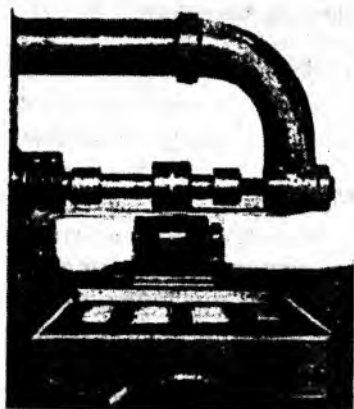


Рис. 5.14. Холодная роликовая сварка на фрезерном станке

Холодная стыковая сварка металлов может осуществляться по схеме, приведенной на рис. 5.15, а и разработанной К.К. Хреновым и Г.П. Сахацким. В корпусе 1 имеются гнездо для неподвижного конусного зажима 2 и направляющие для подвижного корпуса 3, в котором также расположен конусный зажим. После предварительной зачистки торцов детали 4 устанавливаются в зажимы 2, которые имеют формирующие части с режущими кромками 5 и упором 6. Осадочное усилие прикладывается к ползуну 3, при перемещении которого торцы деталей сжимаются и зажимаются с помощью конусов. В процессе осадки углубления 7 заполняются металлом раньше, чем встречаются опорные части 6. Поэтому при встрече опорных частей в зоне сварки создается достаточное напряженное состояние. В стыке происходит провар, а остаток вытекающего металла отрезается кромками 5. В зависимости от расположения режущих кромок соединение может быть с усилением или без усиления.

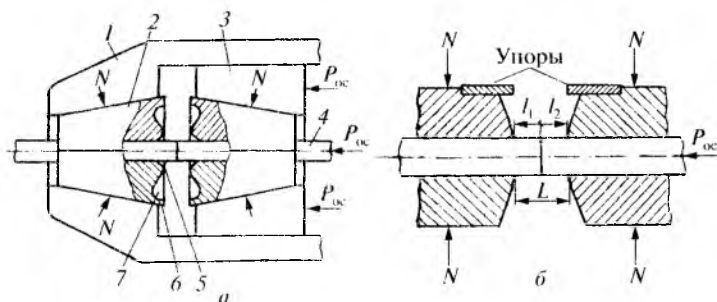


Рис. 5.15. Схемы холодной стыковой сварки

Схема стыковой сварки, предложенная С.Б. Айнбиндером, приведена на рис. 5.15, б.

5.4. Сварка взрывом

Сварка взрывом — сравнительно новый перспективный технологический процесс, позволяющий получать биметаллические заготовки и изделия практически неограниченных размеров из разнообразных металлов и сплавов, в том числе тех, сварка которых другими способами затруднена.

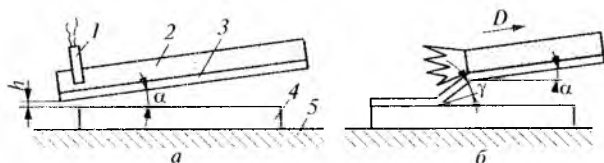


Рис. 5.16. Угловая схема сварки взрывом до начала (а) и в стадии взрыва (б)

При сварке взрывом соединение получается под действием энергии, выделяющейся при взрыве заряда взрывчатого вещества. Схема сварки взрывом приведена на рис. 5.16. Неподвижную пластину (основание) 4 и μεταаемую пластину (облицовку) 3 располагают под углом $\alpha = 2-16^\circ$ на заданном расстоянии $h = 2-3$ мм от вершины угла. На μεταаемую пластину укладывают заряд 2 взрывчатого вещества. В вершине угла устанавливают детонатор 1. Сварка производится на опоре 5.

После инициирования взрыва детонация распространяется по заряду взрывчатого вещества со скоростью D в несколько тысяч метров в секунду. Под действием высокого давления расширяющихся продуктов взрыва метаемая пластина приобретает скорость V_n в несколько сотен метров в секунду и соударяется с неподвижной пластиной под углом γ , который увеличивается с ростом отношения V_n/D . В месте соударения возникает эффект кумуляции — из зоны соударения выбрасывается с очень высокой скоростью кумулятивная струя, состоящая из металла основания и облицовки. Эта струя обеспечивает очистку свариваемых поверхностей в момент, непосредственно предшествующий их соединению. Со свариваемых поверхностей при обычно применяемых режимах сварки удаляется слой металла суммарной толщиной 1–15 мкм.

Соударение метаемой пластины и основания сопровождается пластической деформацией, вызывающей местный нагрев поверхностных слоев металла. В результате деформации и нагрева происходят развитие физического контакта, активация свариваемых поверхностей и образование соединения.

Прочное соединение образуется только там, где соударение сопровождается взаимным сдвигом поверхностных слоев метаемой пластины и основания. В тех местах, где взаимный сдвиг отсутствует, в частности в зоне инициирования взрыва, прочного соединения не получается. Очевидно, что «лобовой» удар метаемой пластины в основание без тангенциальной составляющей скорости и сдвиговой деформации в зоне соединения не приводит к сварке.

Соединяемые поверхности перед сваркой должны быть чистыми (в особенности по органическим загрязнениям), так как ни действие кумулятивной струи, ни вакуумная сдвиговая деформация при соударении не исключают полностью их вредного влияния.

Сварка взрывом дает возможность сваривать практически любые металлы. Однако последующий нагрев сваренных заготовок может вызвать интенсивную диффузию в зоне соединения и образование интерметаллидных фаз, наличие которых приводит к снижению прочности соединения и при достаточно высоких температурах она может снизиться практически до нуля.

Для предотвращения этих явлений сварку взрывом проводят через промежуточные прослойки из металлов, не образующих химических соединений со свариваемыми материалами. Например, при сварке титана со сталью в качестве промежуточного материала используют ниобий, ванадий или тантал.

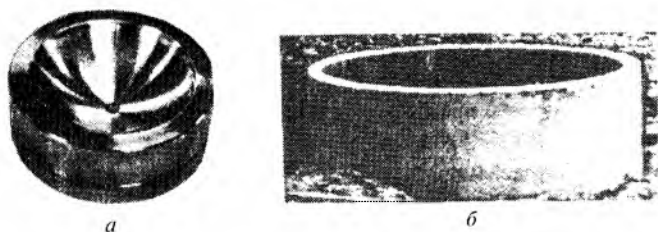


Рис. 5.17. Плакированные взрывом подпятник пресса (а) и обечайка диаметром 4000 мм (б)

Сварка взрывом применяется для плакирования стержней и труб, внутренних поверхностей цилиндров и цилиндрических изделий (рис. 5.17). При плакировании стержней трубу 1 (рис. 5.18, а) устанавливают с зазором на стержень 2. Внутреннюю поверхность трубы и наружную поверхность стержня механически обрабатывают и обезжиривают. На наружную поверхность трубы помещают заряд взрывчатого вещества 3, инициирование которого производят по всему сечению одновременно так, чтобы взрыв распределялся по заряду нормально его оси. Для создания такого фронта используют конус 4 взрывчатого вещества с детонатором 5 в его вершине. Для изоляции зазора от продуктов детонации и центрирования трубы относительно стержня в верхней ее части устанавливают металлический конус 5. В случае плакирования трубных заготовок б внутрь их устанавливается стержень 2. Толщина стенки плакирующей трубы может быть от 0,5 до 15 мм, а диаметр теоретически не ограничивается.

При плакировании внутренних поверхностей используется схема на рис. 5.18, б, предусматривающая размещение плакируемой трубы 1 в массивной матрице 2. Внутрь трубы 1 с зазором устанавливается плакирующая труба 3 с зарядом взрывчатого вещества 4, инициируемого детонатором 5.

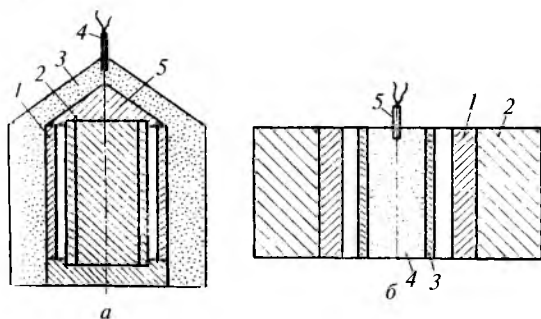


Рис. 5.18. Схема плакирования взрывом стержня (а) и внутренней поверхности трубы (б)

Для внутреннего плакирования крупногабаритных труб и цилиндрических изделий ответственного назначения вместо массивной матрицы 2 применяют дополнительный заряд, расположенный на наружной поверхности плакируемого цилиндра и взрываемый одновременно с внутренним зарядом.

В современных процессах металлообработки взрывом применяют заряды взрывчатого вещества массой от нескольких граммов до сотен килограммов. Большая часть энергии, выделяющейся при взрыве, излучается в окружающую среду в виде ударных волн, сейсмических возмущений, разлета осколков и т.д. Воздушная ударная волна — наиболее опасный поражающий фактор взрыва. Поэтому сварку взрывом производят на полигонах (открытых и подземных), удаленных на значительные расстояния от жилых и промышленных объектов, и во взрывных камерах (рис. 5.19).

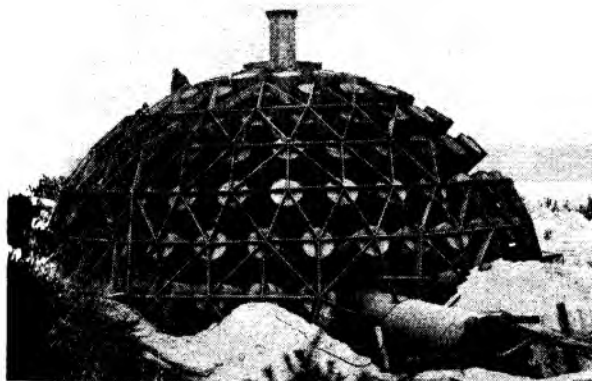


Рис. 5.19. Общий вид камеры для сварки взрывом

5.5. Магнитно-импульсная сварка

Магнитно-импульсная обработка металлов основана на использовании сил электромеханического взаимодействия между вихревыми токами, наведенными в стенках обрабатываемой детали при пересечении их силовыми магнитными линиями импульсного магнитного поля, и самим магнитным потоком. При этом электрическая энергия прямо преобразуется в механическую и импульс давления магнитного поля действует непосредственно на заготовку без участия какой-либо передающей среды.

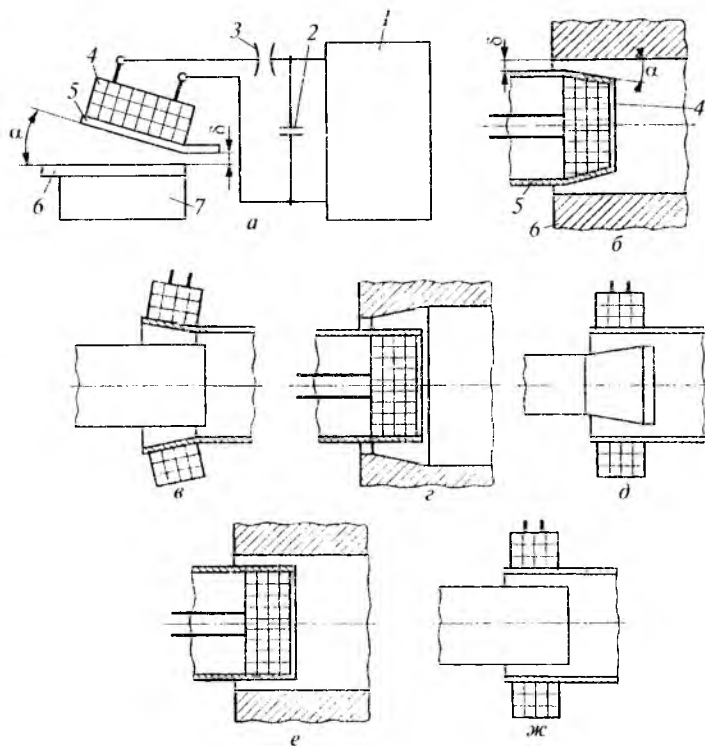


Рис. 5.20. Магнитно-импульсная сварка

В состав установки для магнитно-импульсной сварки (рис. 5.20, а) входят: зарядное устройство 1, состоящее из высоковольтного

трансформатора и выпрямителя; коммутирующее устройство 3, включающееся при подаче поджигающего импульса на вспомогательный электрод и вызывающее разряд батареи высоковольтных конденсаторов 2 на индуктор 4. Свариваемые детали 5 и 6 устанавливают внахлестку под углом α друг к другу с зазором δ между ними. Индуктор 4 устанавливают на поверхности, противоположной свариваемой. Для предотвращения перемещения при сварке деталь 6 жестко закрепляется в опоре 7. Закрепление детали 5 должно обеспечить перемещение ее свариваемого конца в направлении детали 6. При разрядке батареи конденсаторов в зазоре между индуктором и заготовкой возникает сильное магнитное поле, индуцирующее ток в этой заготовке. Взаимодействие тока индуктора с током, индуцированным в заготовке, приводит к возникновению сил отталкивания между индуктором 4 и деталью 5, вследствие чего деталь 5 с большой скоростью перемещается от индуктора в направлении неподвижной детали 6. При соударении в зоне контакта развивается высокое давление, и образуется сварное соединение.

При магнитно-импульсной сварке давление на метаемый элемент передается мгновенно (со скоростью распространения магнитного поля) и движение сообщается не отдельным участкам, как при сварке взрывом, а всей метаемой детали. Чтобы обеспечить последовательное перемещение зоны контакта при сварке, детали устанавливают свариваемыми поверхностями под углом друг к другу, метаемая деталь перед сваркой обрабатывается «на ус» и т.п. Соединение, как и при сварке взрывом, образуется в результате косоугольного соударения свариваемых поверхностей. При этом создаются условия для очистки свариваемых поверхностей от оксидов и загрязнений кумулятивной струей и для интенсивной пластической деформации поверхностей металла с образованием между ними металлических связей.

Формирование сварного соединения возможно также между параллельно расположенными поверхностями. При этом вследствие рассеяния магнитного поля на концах индуктора давление распределяется неравномерно вдоль образующей метаемого элемента: оно меньше по концам и больше в средней

части. При таком нагружении первоначально прямолинейный метаемый элемент, перемещаясь к моменту встречи с неподвижной деталью, становится выпуклым и плоское соударение переходит в косое, распространяющееся в общем случае в двух противоположных направлениях от зоны начального контакта.

Существуют три основные схемы магнитно-импульсной сварки: обжатием трубчатых заготовок с использованием индуктора, охватывающего заготовку (рис. 5.20, б—г); раздачей трубчатых заготовок с использованием индуктора, помещенного внутрь заготовки (рис. 5.20, д, ж); деформированием листовых заготовок плоским индуктором (см. рис. 5.20, а). Для предотвращения деформации тонкостенных элементов в процессе сварки внутрь трубы 5 (см. рис. 5.20, б—г) вставляют металлическую оправку, которую удаляют после сварки.

Действие импульсного магнитного поля на метаемый элемент зависит от: длины и числа витков индуктора; напряжения разряда, емкости батареи конденсаторов, энергии разряда, индуктивности и активного сопротивления разрядного контура, площади внутренней поверхности индуктора в поперечном сечении и др.



Рис. 5.21. Изделия, полученные магнитно-импульсной сваркой

Целесообразной областью применения магнитно-импульсного способа является получение всевозможных соединений трубчатых деталей между собой и с другими деталями, а также плоских деталей по наружному и внутреннему контурам. Этим способом можно сваривать практически любые материалы.

лы в однородном и разнородном сочетаниях. Диапазон толщин метаемых деталей составляет 0,5–2,5 мм (рис. 5.21).

Одной из основных проблем, препятствующих расширению области применения магнитно-импульсной сварки, является получение сильных импульсных магнитных полей при высокой стойкости индуктора. Эта задача решается путем создания новых и совершенствованием существующих конструкций индукторов, применения высокопрочных материалов для токопроводов и элементов механического усиления, разработки новых схем магнитно-импульсных установок.

5.6. Сварка трением

Процессу трения всегда сопутствует превращение части механической энергии в тепловую. При взаимном сухом трении двух металлических деталей температура в трущемся контакте растет пропорционально скорости относительного перемещения деталей и давлению, с которым создается контакт. В технике выделение теплоты при трении рассматривается как вредное явление и с ним, за редким исключением, ведется борьба. Одним из примеров полезного использования теплоты, выделяющейся при трении, является сварка трением — процесс получения неразъемного соединения.

Сварка трением является разновидностью сварки давлением, при которой механическая энергия, подводимая к одной из свариваемых деталей, преобразуется в тепловую, при этом генерирование теплоты происходит непосредственно в месте будущего соединения.

Теплота может выделяться при вращении одной детали относительно другой (рис. 5.22, а), вставки между деталями (рис. 5.22, б, в), при возвратно-поступательном движении деталей в плоскости стыка с относительно малыми амплитудами Δ и при звуковой частоте (рис. 5.22, г) и т.д. При этом детали прижимаются постоянным или возрастающим во времени давлением P . Сварка завершается осадкой и быстрым прекращением вращения.

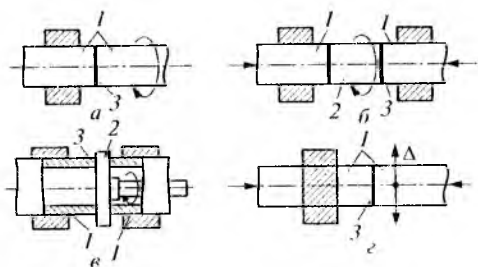


Рис. 5.22. Схемы процесса сварки трением:

1 — свариваемые детали;
2 — вставка; 3 — зона сварки

В зоне стыка при сварке протекают следующие процессы. По мере увеличения частоты вращения свариваемых заготовок при наличии сжимающего давления происходят притирка контактных поверхностей и разрушение жировых пленок, присутствующих на них в исходном состоянии. Граничное трение уступает место сухому. В контакт вступают отдельные микровыступы, они деформируются и образуются ювенильные участки с ненасыщенными связями поверхностных атомов, между которыми мгновенно формируются металлические связи и немедленно разрушаются вследствие относительного движения поверхностей.

Этот процесс происходит непрерывно и сопровождается увеличением фактической площади контакта и быстрым повышением температуры в стыке. С ростом температуры снижается сопротивление металла деформации и трение распространяется на всю поверхность контакта. В зоне стыка появляется тонкий слой пластифицированного металла, выполняющего роль смазочного материала. Трение из сухого становится как бы граничным. Под действием сжимающего усилия металл вытесняется из стыка и свариваемые поверхности сближаются (осадка). Контактные поверхности оказываются подготовленными к образованию сварного соединения: металл в зоне стыка обладает низким сопротивлением из-за высокотемпературной деформации, оксидные пленки утончены, частично разрушены и удалены в грат, соединяемые поверхности активированы.

После торможения, когда частота вращения приближается к нулю, наблюдается некоторое понижение температуры металла в стыке за счет теплоотвода. Осадка сопровождается образованием металлических связей по всей поверхности.

Область применения сварки трением ограничена формой сечения свариваемых деталей. При вращательном движении сварка трением позволяет получать хорошие результаты лишь в тех случаях, когда одна из подлежащих сварке деталей представляет собой тело вращения (стержень, трубу), ось которого совпадает с осью вращения, а другая деталь обладает плоской поверхностью. Возможны следующие виды соединений, выполняемых с помощью сварки трением (рис. 5.23): стержни встык, трубы встык, стержень встык с трубой, Т-образное соединение стержня или трубы и детали с плоской поверхностью.

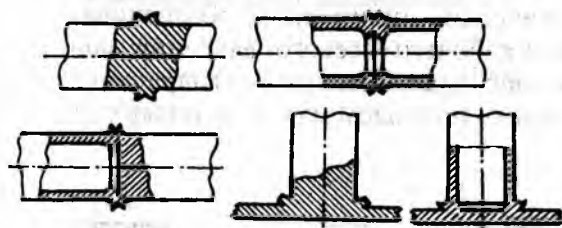


Рис. 5.23. Типы соединений, выполненных сваркой трением

Возможности применения сварки трением ограничиваются также размерами сечения свариваемых деталей в месте их сопряжения. Так, нецелесообразно данным способом сваривать стержни диаметром более 200 мм, потому что для реализации этого процесса потребовались бы машины с двигателями мощностью около 500 кВт при скорости вращения порядка 2 с^{-1} и с осевым усилием более $3 \cdot 10^6 \text{ Н}$. Сооружение такой машины и ее эксплуатация были бы настолько дорогими, что не окупили бы выгоды, которые может дать сварка трением.

Даже в лабораторных условиях не удастся сварить стержни диаметром менее 3,5 мм, для которых нужна установка со скоростью вращения шпинделя примерно 200 с^{-1} и сложным устройством для осуществления его мгновенного торможения. Расчеты и опыт практического применения сварки трением показывают, что ее пока целесообразно применять для сварки деталей диаметром от 6 до 100 мм.

Применение сварки трением наиболее эффективно для изготовления режущего инструмента при производстве составных сварно-кованых, сварно-литых или сварно-штампованных деталей. Она незаменима при соединении трудносвариваемых или вовсе не сваривавшихся другими способами

разнородных материалов, например стали с алюминием, аустенитных сталей с перлитными и т.п. Эффективно использование сварки трением и для соединения пластмассовых заготовок.

Машины для сварки трением обычно содержат следующие основные узлы (рис. 5.24): привод вращения шпинделя 1 с ременной передачей 2, фрикционную муфту 3 для сцепления шпинделя с приводным устройством, тормоз 4 для торможения шпинделя, два зажима для крепления свариваемых заготовок 7, переднюю бабку 5 со шпинделем, несущим вращающийся зажим 6, заднюю бабку 8 с неподвижным зажимом, пневматические или гидравлические цилиндры 9, обеспечивающие создание необходимого рабочего (осевого) давления машины; пневматическую, пневмогидравлическую или гидравлическую схему управления силовым приводом машины, шкаф управления.

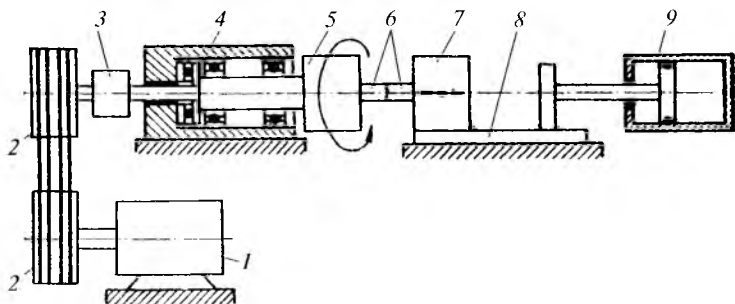


Рис. 5.24. Принципиальная конструктивно-кинематическая схема машины для сварки трением

В состав привода вращения большинства машин входят трехфазный асинхронный электродвигатель, клиноременная передача с зубчатым ремнем. В машинах для микро- и прецизионной сварки, шпиндель которых должен развивать очень высокую скорость вращения ($80\text{--}650\text{ с}^{-1}$), в качестве привода используются пневматические турбинки, которые характеризуются быстрым разгоном и торможением, позволяют обходиться без передачи при помощи непосредственного сочленения вала со шпинделем машины.

На рис. 5.25 приведен общий вид установки сварки трением с последующим удалением грата в автоматическом режиме.

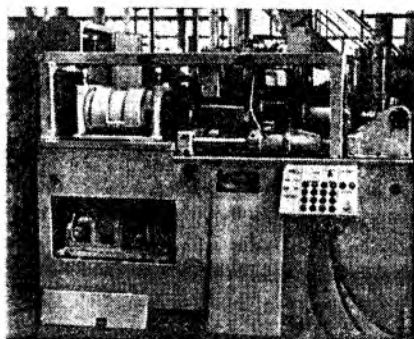


Рис. 5.25. Установка СТ110 для сварки трением автомобильных выпускных клапанов

Как показывает мировой опыт, сварка трением является одним из наиболее интенсивно развивающихся технологических процессов, особенно в странах с высоким уровнем развития промышленности.

Некоторые примеры применения сварки трением приведены на рис. 5.26, 5.27.

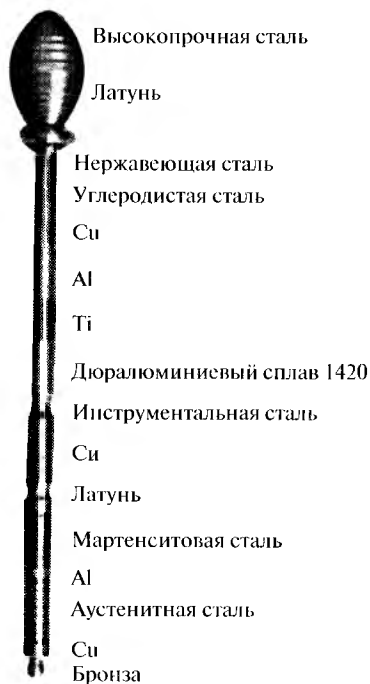


Рис. 5.26. Декоративный жезл из разнородных металлов, изготовленный с помощью сварки трением

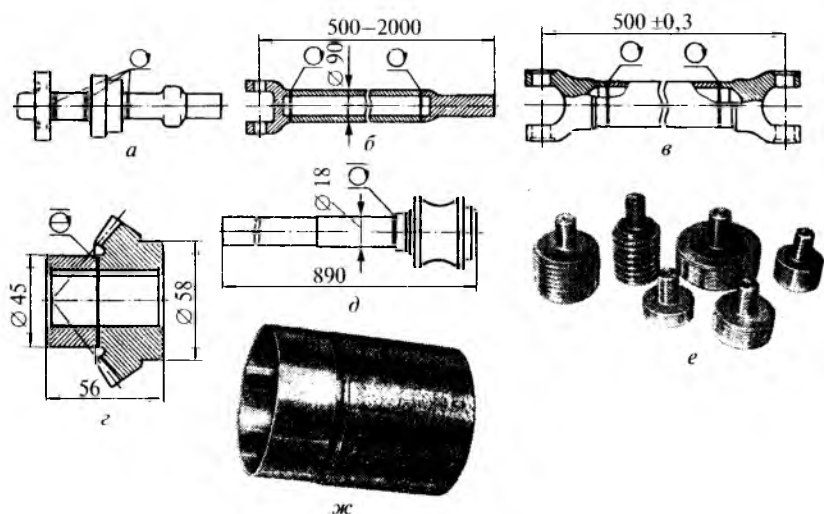


Рис. 5.27. Примеры применения сварки трением:

а — промежуточный вал коробки передач автомобиля; *б* — карданный вал тяжелого грузового автомобиля; *в* — карданный вал автомобиля «Форд»; *г* — коническое зубчатое колесо с удлиненной ступицей; *д* — вал рулевого управления легкового автомобиля; *е* — гладкие и резьбовые калибры; *ж* — сталеалюминиевый трубчатый переходник диаметром 90 мм со стенкой толщиной 4 мм

Сварка трением с перемешиванием. В декабре 1991 г. Британским институтом сварки был запатентован новый способ сварки трением, позволяющий выполнять стыковые и нахлесточные швы листовых заготовок. Условно он был назван способом сварки трением с перемешиванием (СТП, английский эквивалент FSW — Friction Stir Welding).

При этом способе процесс сварки (см. рис. 5.28) происходит следующим образом. Специальный вращающийся инструмент, состоящий из утолщенной части — заплечика (shoulder) и выступающей части — штыря, в месте стыка вводится с прижимающим усилием в соприкосновение с поверхностью зафиксированных на массивной подкладке соединяемых заготовок. В результате трения штыря и заплечика о заготовку выделяется теплота, которая доводит металл вокруг инструмента до пластичного состояния. При этом штырь внедряется в заготовки, а заплечик касается их поверхности. Затем инструменту сообщают поступательное движение со скоростью сварки, и материал

заготовок, перемещаясь из зоны нагрева в зону охлаждения, огибает штырь и образует соединение.

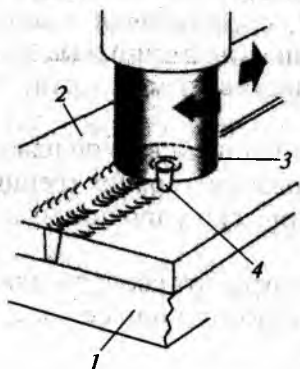


Рис. 5.28. Схема процесса сварки трением с перемешиванием:
1 — подкладка; 2 — изделие; 3 — заплечик; 4 — штырь со специальным профилем

По характеру протекания процесса получения соединения этот способ имеет много общего с прессованием. Поскольку алюминиевые сплавы являются благоприятным в этом отношении материалом, то СТП главным образом реализована для алюминия и его сплавов. Основными преимуществами процесса СТП являются следующие:

беспористые швы можно получить на любом алюминиевом сплаве, включая сплавы, чувствительные к пористости (сплавы с магнием, литием и др.);

не требуется специальной разделки кромок и удаления оксидной пленки перед сваркой;

качественные соединения достигаются во всех пространственных положениях;

не требуется высокой квалификации оператора;

процесс сварки идеально подходит для автоматизации;

энергия используется с высокой эффективностью. Например, при выполнении однопроводной сварки алюминиевого сплава толщиной 12,5 мм затрачивается мощность установки всего около 3 кВт;

сварка может выполняться в сильных магнитных полях, например при соединении шинопроводов;

- ♦ в процессе сварки отсутствуют специфические вредные факторы — дым, шум и ультрафиолетовое излучение;
- ♦ не нужны присадочный металл и защитный газ.

Низкий уровень деформаций, высокая воспроизводимость качества швов, полученных СТП, способствуют получению качественных сварных конструкций из алюминиевых сплавов. При этом реализуются технологические возможности, позволяющие получать:

- ♦ швы на сплавах, которые нельзя выполнить сваркой плавлением из-за чувствительности к образованию горячих трещин;
- ♦ более высокая прочность для термически упрочняемых сплавов;
- ♦ шов в твердой фазе, позволяющий сохранить свойства для металлов стабильных сплавов, таких, как композиты или сплавы, полученные быстрой кристаллизацией;
- ♦ крупные панели, состоящие из многочисленных небольших профилей, которые практически невозможно или экономически нецелесообразно прессовать или отливать;
- ♦ соединение легковесных прессованных панелей без деформаций для получения более крупных конструкций судов, железнодорожных платформ или тяжелых грузовиков;
- ♦ полые заготовки путем соединения более простых полуфабрикатов, изготовленных литьем или штамповкой;
- ♦ сварные узлы со стыковыми и нахлесточными швами из заготовок, изготовленных с помощью различных технологий (литье, прессование и др.).

Кроме того, сборка стыков не требует очень точной подгонки кромок; так, зазор может достигать 0,2 мм для листов толщиной 1,6 мм и 1,25 мм для плит толщиной 12,7 мм.

К недостаткам способа СТП можно отнести:

- ♦ необходимость в мощных подкладках, на которых должны надежно закрепляться свариваемые заготовки;
- ♦ образование в конце шва отверстия диаметром, равным размеру штыря, которое необходимо заполнять специальными пробками с помощью других методов, таких, как сварка трением;
- ♦ применение вводных и выводных планок для получения протяженных швов на всю длину заготовок;

ограничения в применении способа сварки в портативном варианте из-за закрепления заготовок на подкладке; несколько более низкую скорость сварки, чем механизированной дуговой сваркой, для некоторых марок сплавов.

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

На рис. 5.29 приведены значения скорости сварки и частоты вращения рабочего инструмента, которые позволяют получить качественные соединения алюминиевых сплавов серий 5000 и 6000. Видно, что сплавы серии 6000 можно сваривать в более широком диапазоне режимов, чем сплавы серии 5000.



Рис. 5.29. Соотношение скорости сварки и частоты вращения инструмента, позволяющее получать качественные соединения алюминиевых сплавов серий 5000 и 6000

Типы соединений, выполняемые СТП, характеризуются большим разнообразием — стыковые, традиционные для дуговой сварки, угловые тавровые и нахлесточные (рис. 5.30), а также различного рода замковые и прорезные (рис. 5.31) швы.

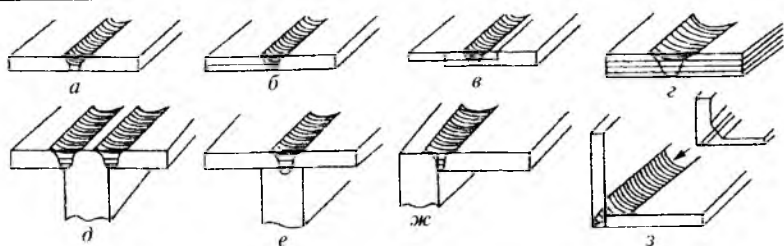


Рис. 5.30. Характерные типы соединений, выполняемые СТП:

а — стыковое, *б* — нахлесточно-стыковое; *в* — нахлесточное; *г* — многослойное нахлесточное; *д* — двухпроходное тавровое; *е* — тавровое прорезное; *ж*; *з* — угловое

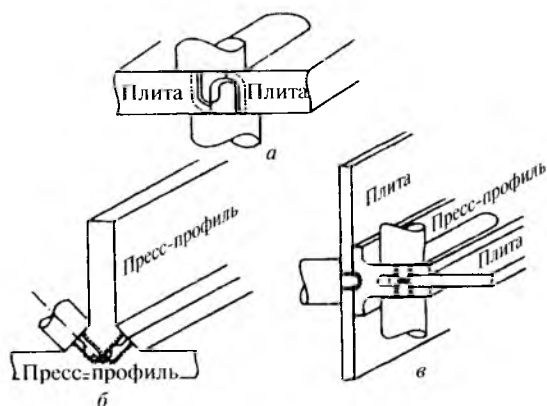


Рис. 5.31. Варианты соединений СТП различных полуфабрикатов:

а — двухстороннее стыковое замковое; *б* — угловое замковое; *в* — прорезное

Особое внимание при создании СТП было уделено разработке конструкции вращающегося инструмента, от которого зависит формирование соединений. Некоторые варианты инструмента приведены на рис. 5.32.

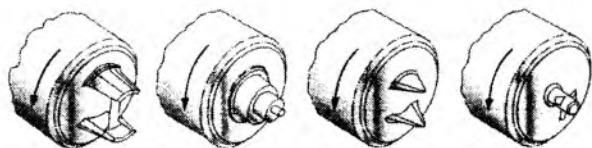


Рис. 5.32. Варианты инструмента, применяемого при СТП

Технологические возможности рабочего инструмента расширяет конструкция с регулируемым в процессе сварки длиной штыря и диаметром заплечика, позволяющая сваривать заготовки переменного сечения, а при выполнении кольцевых

швов — избегать образования отверстия в конце шва. На этой основе реализован программируемый процесс сварки, когда за счет изменения длины штыря от нуля до значения, равного толщине свариваемых заготовок, осуществляется плавный выход на достижение полного проплавления и процесс сварки завершается без образования отверстия.

Надежное прижатие заплечика к поверхности свариваемых заготовок и тем самым постоянный тепловой режим в зоне сварки обеспечивает конструкция рабочего инструмента с подвижным заплечиком, который постоянно находится в подпружиненном состоянии с заданным усилием (см. рис. 5.33).

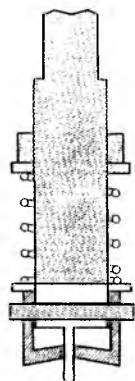


Рис. 5.33. Рабочий инструмент с подпружиненным заплечиком

При сварке некоторых высокопрочных алюминиевых сплавов для уменьшения прилипания металла к штырю и отвода избыточной теплоты используют инструмент с охлаждением его наружной стороны путем пропускания хладагента (воды) или обдува воздухом (рис. 5.34, а) или в котором хладагент подается по каналам, расположенным внутри инструмента (рис. 5.34, б).

Свойства соединений алюминиевых сплавов, полученных с помощью СТП, весьма высоки: прочность после сварки и искусственного старения составляет до 90 % исходной, а показатели пластичности находятся такие же, как у основного металла. Установлено, что прочностные характеристики соединений СТП превышают аналогичные характеристики, полученные другими способами сварки. Анализ данных по усталостным испытаниям соединений алюминиевых сплавов,

полученных СТП, показал, что их работоспособность во многих случаях выше, чем соединений, полученных сваркой плавлением; при этом наблюдается меньший разброс значений.

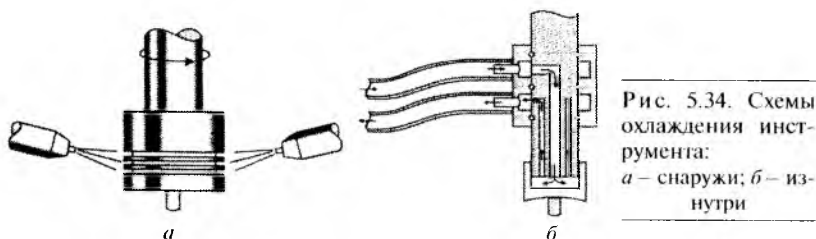


Рис. 5.34. Схемы охлаждения инструмента:
а — снаружи; б — изнутри

5.7. Ультразвуковая сварка

При ультразвуковом способе сварки соединение образуется под действием ультразвуковых (с частотой 20—40 кГц) колебаний и сжимающих давлений, приложенных к свариваемым деталям.

Ультразвуковые (УЗ) колебания в сварочных установках получают следующим образом. Ток от УЗ-генератора подается на обмотку магнитострикционного преобразователя (вибратора), который собирается из пластин толщиной 0,1—0,2 мм (рис. 5.35). Геометрические размеры материала, из которого они изготовлены, могут изменяться под действием переменного магнитного поля.

Если магнитное поле направлено вдоль пакета пластин, то любые его изменения приведут к укорочению или удлинению магнитостриктора, что обеспечивает преобразование высокочастотных электрических колебаний в механические той же частоты. Вибратор с помощью припоя (или клея) соединяется с волноводом или концентратором (инструментом), который может усиливать амплитуду колебаний.

Волноводы цилиндрической формы передают колебания, не изменяя их амплитуды, а ступенчатые, конические концентраторы усиливают их. Размеры и форму концентратора рассчитывают с учетом коэффициента усиления. Как правило, достаточен коэффициент 5, обеспечивающий амплитуду колебаний

баний рабочего выступа при холостом ходе 20—30 мкм. Размеры волноводной системы подбираются так, чтобы в зоне сварки был максимум амплитуды колебаний (кривая упругих колебаний на рис. 5.35, *а*).

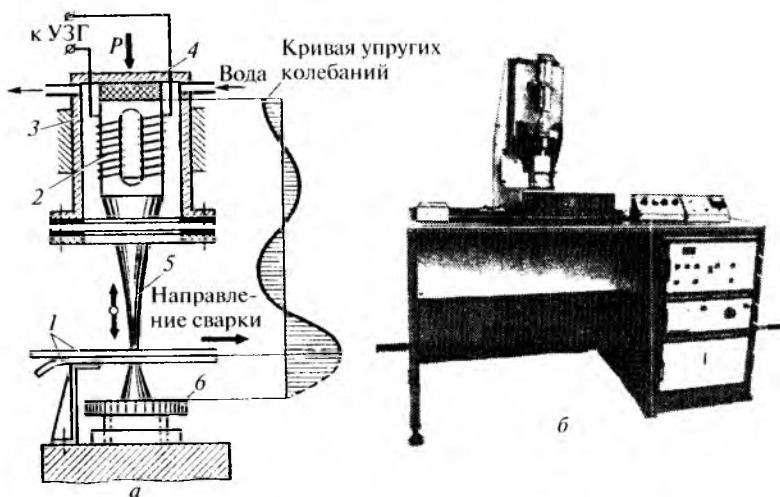


Рис. 5.35. УЗ-сварка:

а — схема осуществления процесса; *б* — установка УЗ-сварки; 1 — свариваемые детали; 2 — вибратор; 3 — кожа; 4 — акустический узел; 5 — инструмент; 6 — регулировочный винт опоры

При этом методе сварки колебательные движения УЗ-частоты разрушают неровности поверхности (рис. 5.36) и оксидный слой. Когда на соединяемые детали совместно воздействуют механические колебания и относительно небольшое давление сварочного инструмента—волновода, происходит течение металла в зоне соединяемых поверхностей без внешнего подвода теплоты. За счет трения, вызванного возвратно-поступательным движением сжатых контактирующих поверхностей, поверхностные слои материалов нагреваются. Трение не является доминирующим источником теплоты при сварке, например, металлов, но его вклад в образование сварного соединения существен.

УЗ-сварка может применяться для соединения металла небольших толщин, широко используется для сварки полимерных материалов. При сварке полимеров УЗ-колебания подаются

ся волноводом перпендикулярно соединяемым поверхностям и под их воздействием возникает интенсивная диффузия — перемещение макромолекул из одной соединяемой части в другую.

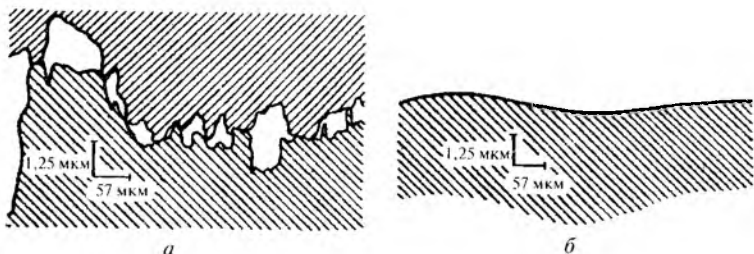


Рис. 5.36. Профиль поверхности:

а — двух собранных медных деталей перед УЗ-сваркой; *б* — нижней детали после воздействия ультразвука

Разработан процесс УЗ-сварки костных тканей в живом организме, основанный на свойстве ультразвука ускорять процесс полимеризации некоторых мономеров. Так, циакрин — этиловый эфир цианакриловой кислоты — под действием ультразвука образует твердый полимер в течение десятков секунд, тогда как без ультразвука процесс полимеризации идет не несколько часов. Это явление легло в основу соединения (сварки) обломков костной ткани с помощью циакрина, смешанного с костной стружкой. Циакрин затвердевает и соединяется с костной тканью, проникая в ее капилляры под действием УЗ-колебаний. В результате получается прочное соединение отдельных частей кости между собой.

С помощью УЗ-сварки к кристаллам кремния полупроводниковых приборов можно присоединять алюминиевые проводники-выводы, которыми осуществляется подключение приборов к внешним электрическим цепям. Диапазон геометрических размеров контактных площадок полупроводниковых приборов очень широк — от нескольких микрометров у интегральных схем и дискретных транзисторов до 400–700 мкм у мощных транзисторов и диодов. Присоединение выводов наиболее трудоемкая операция в цикле изготовления приборов.

Весьма высокую эффективность УЗ-сварка показала при сварке токоотводов алюминиевых электролитических конденсаторов на сварочной машине типа МТУ (см. рис. 5.37): при

УЗ-сварке брака не было вообще, а при конденсаторной сварке наблюдалось 50 % брака. Машины данной серии позволяют сваривать разнородные металлы толщинами от $0,2 + 0,2$ до $1,2 + 1,2$ мм с производительностью до 60 точек в 1 мин.

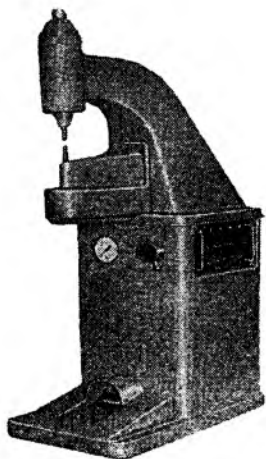


Рис. 5.37. Машина МТУ-1,5 для точечной УЗ-сварки металлов

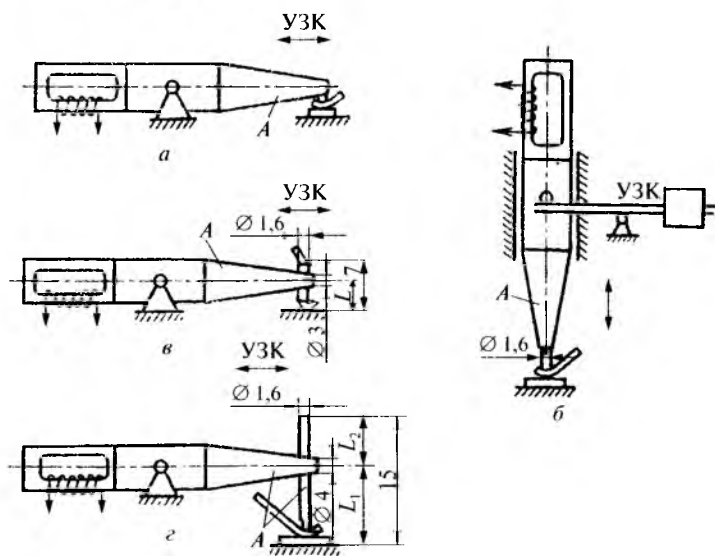


Рис. 5.38. Схемы выполнения УЗ-сварки с использованием продольной (а, б) и продольно-поперечной (в, г) колебательных систем

Разработано несколько вариантов УЗ-сварки кристаллов с выводами: с использованием продольной, поперечной, продольно-поперечной и крутильной колебательных систем (рис. 5.38).

5.8. Сварка прокаткой

Сварка прокаткой — высокопроизводительный технологический процесс, используемый для получения биметаллов как из разнородных металлов, так и из металлов, близких по химическому составу, но различающихся по свойствам. Этот процесс применяется для производства листов, полос, лент, фасонных профилей, прутков, проволоки. Соединение компонентов биметалла происходит при их совместной горячей или холодной пластической деформации, осуществляемой в прокатных станах в вакууме или на воздухе.

Исходной заготовкой для получения биметалла является пакет, состоящий из двух различных слоев металла в виде слябов и пластин. Обычно применяют одинарные пакеты для получения одного листа биметалла (рис. 5.39, а), двойные симметричные пакеты для получения двух листов биметалла (рис. 5.39, б) и тройные пакеты для получения трех листов биметалла, два из которых двухслойные, а один трехслойный (рис. 5.39, в).

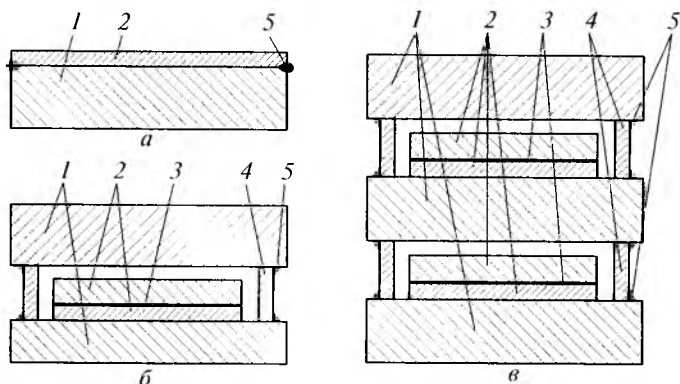


Рис. 5.39. Конструкции пакетов для сварки прокаткой:

1 — основной слой; 2 — плакирующий слой; 3 — разделительный слой; 4 — технологическая планка; 5 — сварной шов

Так как надежное соединение слоев обеспечивается при 5–7-кратном обжатии, для получения биметаллического листа толщиной 25 мм исходная толщина пакета должна составлять не менее 250–350 мм. Ширина слябов, применяемых для основного слоя при производстве двухслойных коррозионно-стойких листов из стали, обычно составляет 700–1200 мм, а длина 1700–2500 мм. Слябы основного слоя из углеродистой и низколегированной стали подвергают правке на прессе и механической обработке по свариваемой поверхности с последующим обезжириванием, промывкой и сушкой. Одновременно подготавливают пластины плакирующего слоя.

Для уменьшения степени окисления поверхностей заготовок при их нагреве перед сваркой прокаткой пакеты герметизируют сварным швом по периметру, а в ряде случаев сварку производят в защитной атмосфере (вакууме или инертном газе).

Для нагрева пакетов перед прокаткой применяют нагревательные шахтные или камерные печи обычной конструкции. Температура нагрева, например, пакетов из углеродистой и коррозионно-стойких сталей составляет 1200–1250 °С.

При получении биметаллических листов с покрытием из активных металлов (например, титана) используют герметичную конструкцию пакета, внутри которого размещен пиррофорный материал церий; при нагреве пакета он сгорает и связывает кислород окружающей среды. Надежное соединение в процессе горячей прокатки легкоокисляющихся металлов достигается при использовании вакуумных прокатных станов.

Пакеты прокатывают (рис. 5.40) на обычных прокатных станах, на которых получают однослойные листы аналогичных размеров.

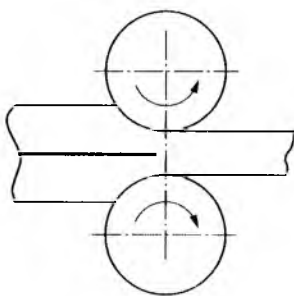


Рис. 5.40. Схема сварки прокаткой

Холодную сварку прокаткой применяют для получения двух- или трехслойных биметаллов, состоящих из стальной основы и плакирующих слоев из цветных металлов, например сталь + медь, сталь + латунь, медь + алюминий, алюминий + титан, алюминий + сталь + алюминий и др. Получение качественного соединения слоев в биметалле требует значительной деформации при сварке прокаткой и чистоты соединяемых поверхностей, причем особенно важно отсутствие органических веществ.

При сварке прокаткой вначале происходит смятие микронеровностей и увеличение площади контактных поверхностей из-за значительной вытяжки, приводящей к утончению и частичному разрушению оксидных пленок. В отдельных местах контактирования свариваемых поверхностей образуются участки схватывания, между которыми остаются полости, содержащие газы. Дальнейшее увеличение числа и площади участков схватывания возможно за счет развития процесса адсорбции остаточных газов металлом. При дополнительной пластической деформации по мере поглощения газа металлом участки схватывания расширяются, формируются зоны взаимодействия, граница соединения превращается в непрерывную межфазную границу.

При сварке прокаткой соединение образуется в условиях принудительного деформирования и малой длительности взаимодействия. Образование соединения заканчивается схватыванием контактных поверхностей и релаксацией напряжений в той мере, в какой это необходимо для сохранения образовавшихся межатомных связей.

5.9. Термитная сварка

При термитной сварке источником теплоты служит перегретый расплавленный металл, образовавшийся в результате горения термитов — порошкообразных смесей металлов с оксидами других металлов.

Для сварки чаще всего применяют алюминиевые термиты, содержащие 20–25 % алюминиевого порошка и 75–80 % же

лезной окалины. Кроме того, в термиты можно вводить легирующие элементы для улучшения механических свойств и металлический наполнитель — железную обсеckу для увеличения выхода жидких продуктов реакции.

Воспламенение термитной смеси происходит при температуре более 1300 °С. Для этого применяют термитные спички или электрозапальные устройства. Начавшееся горение протекает бурно, быстро распространяется на весь объем смеси, и термит полностью сгорает за 20–30 с. Термит сжигают в огнеупорном тигле. Размер тигля зависит от сжигаемой порции термита. После сжигания термита в тигле находится жидкая сталь и шлак в сильно перегретом состоянии: на 1 кг термитной смеси образуется 550 г расплавленной стали и 450 г шлака, состоящего из оксида алюминия.

Термитной сваркой сваривают в основном рельсы, стыки арматуры, провода, линии связи и электропередачи. Ее можно использовать для ремонта крупных стальных и чугунных деталей, для приливки отломанных частей стальных деталей, например зубьев крупных шестерен.

Чтобы удержать жидкий металл в месте сварки, применяют сварочные разъемные формы. Наиболее распространена сварка способом промежуточного литья с предварительным подогревом стыка или без подогрева.

При *предварительном подогреве* стык собирают с зазором 12–14 мм, устанавливают и закрепляют форму, которую промазывают огнеупорной глиной. Затем через отверстие в наружной половине формы вставляют горелку и концы стыкуемых деталей нагревают до 850–900 °С. Термитный металл, расплавленный в тигле, после выдержки в течение 4–6 с выпускают в форму.

Для термитной сварки способом промежуточного литья *без предварительного подогрева* стыка тигель и форма составляют одно целое. Тигельное пространство отделено от заливаемого сформованного пространства запорной пластиной, толщина которой выбрана так, чтобы она расплавилась после окончания термитной реакции. Перегретый металл заливают в форму, оплавливают концы стыкуемых деталей, и образуется сварное соединение. Первая порция металла, которая стекает в дополни-

тельное пространство, образуя прибыль, подогревает концы стыкуемых деталей. Расход термита для сварки без подогрева почти в 2 раза больше, чем для сварки с подогревом, однако производительность сварки значительно выше, так как предварительный подогрев занимает 15–20 мин.

Поперечное сечение тигля для термитной сварки и принципиальная схема арматурных стержней показаны на рис. 5.41.

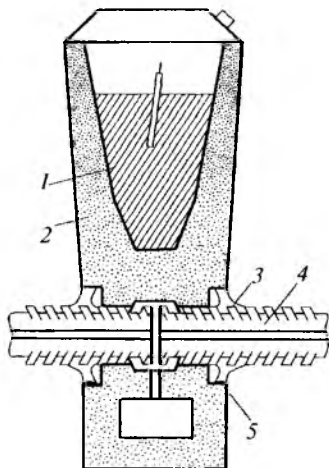


Рис. 5.41. Схема термитной сварки арматуры:

1 – тигель; 2 – термитная смесь; 3 – огнеупорная глина; 4 – свариваемое изделие; 5 – асбестовое уплотнение

Наличие влаги в форме, на соединяемых кромках недопустимо, так как при заливке расплавленного металла образовавшийся пар может привести к выбросу жидкого металла. Согласно правилам техники безопасности, персонал должен иметь защитную одежду, закрывать лицо прозрачным щитком.

5.10. Диффузионная сварка

Отличительной особенностью диффузионной сварки от других способов сварки давлением является применение относительно высоких температур нагрева ($0,5\text{--}0,7$) $T_{пл}$ и сравнительно низких удельных сжимающих давлений ($0\text{--}0,5$ МПа) при изотермической выдержке от нескольких минут до нескольких часов.

Формирование диффузионного соединения определяется такими физико-химическими процессами, протекающими при сварке, как взаимодействие нагретого металла с газами окружающей среды; очистка свариваемых поверхностей от оксидов; развитие высокотемпературной ползучести и рекристаллизации. В большинстве случаев это диффузионные, термически активируемые процессы.

Для уменьшения скорости окисления свариваемых заготовок и создания условий очистки контактных поверхностей от оксидов при сварке применяют газы-восстановители, расплавы солей, флюсы, обмазки, но в большинстве случаев используют вакуум или инертные газы.

Очистка поверхностей металлов от оксидов возможна в результате развития процессов сублимации и диссоциации оксидов, растворения оксидов за счет диффузии кислорода в металл (ионов металла в оксид), восстановления оксидов элементами-раскислителями, содержащимися в сплаве и диффундирующими при нагреве к границе раздела металл — оксид. Расчеты и эксперименты показывают, что, например, на стали оксиды удаляются наиболее интенсивно путем их восстановления углеродом, а на титане — за счет растворения кислорода в металле.

Сближение свариваемых поверхностей происходит в первую очередь за счет пластической деформации микровыступов и приповерхностных слоев, образовавшихся за счет приложения внешних сжимающих напряжений и нагрева металла.

В процессе деформации свариваемых поверхностей, свободных от оксидов, происходит их активация, а развитие физического контакта между такими поверхностями обуславливает их схватывание.

При диффузионной сварке одноименных металлов сварное соединение достигает равнопрочности с основным материалом в том случае, когда структуры зоны соединения и основного материала одинаковы. Для этого в зоне контакта должны образовываться общие для соединяемых материалов зерна. Это возможно за счет миграции границ зерен, осуществляемой путем либо рекристаллизации обработки, либо собирательной рекристаллизации.

С помощью диффузионной сварки в вакууме получают высококачественные соединения керамики с коваром, медью, титаном, жаропрочных и тугоплавких металлов и сплавов, электровакуумных стекол, оптической керамики, сапфира, графита с металлами, композиционных и порошковых материалов и др.

Соединяемые заготовки могут иметь разную форму и компактные (рис. 5.42, *а—в*) или развитые (рис. 5.42, *г—ж*) поверхности контактирования. Геометрические размеры свариваемых деталей находятся в пределах от нескольких микрон (при изготовлении полупроводниковых приборов) до нескольких метров (при изготовлении слоистых конструкций).

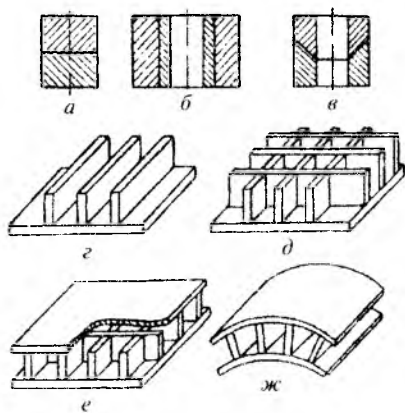


Рис. 5.42. Некоторые типы конструкций, получаемых диффузионной сваркой

Схематически процесс диффузионной сварки можно представить следующим образом. Свариваемые заготовки собирают в приспособлении, позволяющем передавать давление в зону стыка, вакуумируют и нагревают до температуры сварки, затем прикладывают сжимающее давление на заданный период времени. В некоторых случаях после снятия давления изделие дополнительно выдерживают при температуре сварки для более полного протекания рекристаллизационных процессов, способствующих формированию качественного соединения. По окончании сварочного цикла сборка охлаждается в вакууме, инертной среде или на воздухе в зависимости от типа оборудования.

По напряжению, вызывающему деформацию металла в зоне контакта и определяющему процесс формирования диффузионного соединения, условно различают сварку с высокоинтенсивным ($P \geq 20$ МПа) и низкоинтенсивным ($P \leq 2$ МПа) силовым воздействием.

При сварке с высокоинтенсивным воздействием сварочное давление создают, как правило, с помощью прессы, снабженного вакуумной камерой и нагревательным устройством (рис. 5.43). Но такие установки позволяют сваривать детали ограниченных размеров (как правило, диаметром до 80 мм).

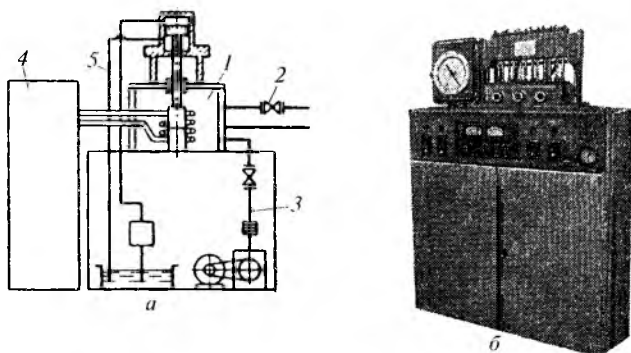


Рис. 5.43. Принципиальная схема установки для диффузионной сварки (а) и общий вид многопозиционной установки СДВУ-4М (б):

1 – вакуумная камера; 2 – система охлаждения камеры; 3 – вакуумная система; 4 – высокочастотный генератор; 5 – гидросистема прессы

Для изготовления крупногабаритных двухслойных конструкций (рис. 5.42, з, д) используют открытые прессы. При этом свариваемые детали перед помещением в пресс собирают в герметичные контейнеры, которые вакуумируют и нагревают до сварочной температуры (см. рис. 5.43).

Для исключения возможности потери устойчивости свариваемых элементов, передачи давления в зону сварки и создания условий локально направленной деформации свариваемого металла в зоне стыка диффузионную сварку осуществляют в приспособлениях, используя для заполнения «пустот» (межреберных пространств) технологические вкладыши и блоки (рис. 5.44), которые после сварки демонтируют или удаляют химическим травлением.

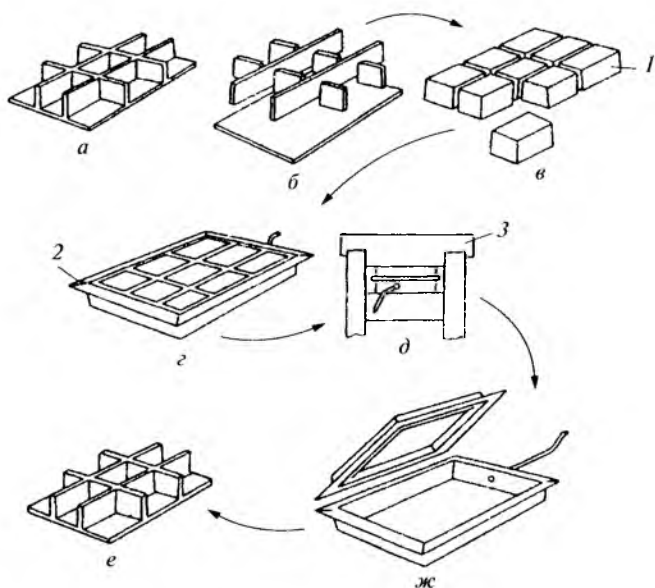


Рис. 5.44. Технологическая схема диффузионной сварки с высокоинтенсивным силовым воздействием:

а – требуемая конструкция; *б* – заготовки для сварки; *в* – технологические элементы-вкладыши; *г* – сборка; *д* – сварка в прессе; *е* – демонтаж; *ж* – готовая конструкция; *1* – технологические вкладыши; *2* – технологический контейнер; *3* – пресс

При сварке с высокоинтенсивным силовым воздействием локальная деформация металла в зоне соединения, как правило, достигает нескольких десятков процентов, что обеспечивает стабильное получение качественного соединения.

Для изготовления слоистых конструкций (см. рис. 5.42, *е, ж*) перспективна диффузионная сварка с низкоинтенсивным силовым воздействием, при которой допустимые сжимающие усилия ограничены устойчивостью тонкостенных элементов. При таком способе диффузионной сварки не требуется сложное специализированное оборудование.

При изготовлении плоских (или с большим радиусом кривизны) конструкций сжимающее усилие наиболее просто обеспечивается за счет атмосферного давления воздуха Q на внешнюю поверхность технологической оснастки при понижении давления газа в зоне соединения (рис. 5.45). Наличие технологических элементов (прокладок, мембран и т.д.), обла

дающих локальной жесткостью и помещенных с внешней стороны свариваемых элементов, исключает возможность потери устойчивости обшивок в виде прогибов неподкреплённых участков. Сварочное давление P ограничивается предельным напряжением потери устойчивости заполнителя $\sigma_{\text{ит}}$ ($P < \sigma_{\text{ит}}$).

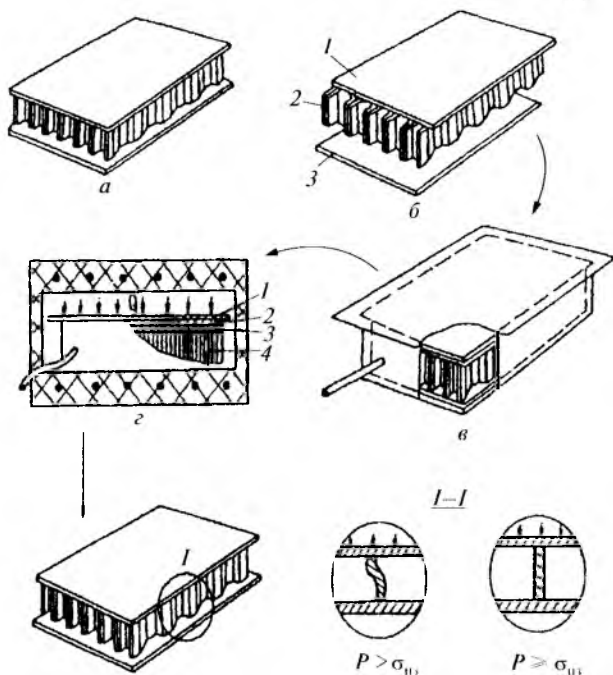


Рис. 5.45. Технологическая схема диффузионной сварки с низкоинтенсивным силовым воздействием плоских конструкций:

а — требуемая конструкция; б — заготовки для сварки; в — сборка; г — сварка; д — готовая конструкция; 1 — несущая обшивка; 2 — готовый заполнитель; 3 — технологические листы; 4 — мембрана

При изготовлении конструкций сложного криволинейного профиля может быть использована технологическая схема (рис. 5.46), при которой давление нейтрального газа воспринимается непосредственно внешними элементами самой конструкции (несущими обшивками, оболочками и т.п.). В процессе сварки обшивки на неподкреплённых участках деформируются (прогибаются) под давлением газа. Это, с одной стороны,

ухудшает условия для формирования соединения, а с другой — уменьшает сечение сообщающихся каналов, ухудшает аэродинамическое состояние поверхности и т.д. В этом случае P ограничивается напряжением, при котором имеет место чрезмерная остаточная деформация обшивок на неподкрепленных участках ($P \leq \sigma_{\text{но}}$).

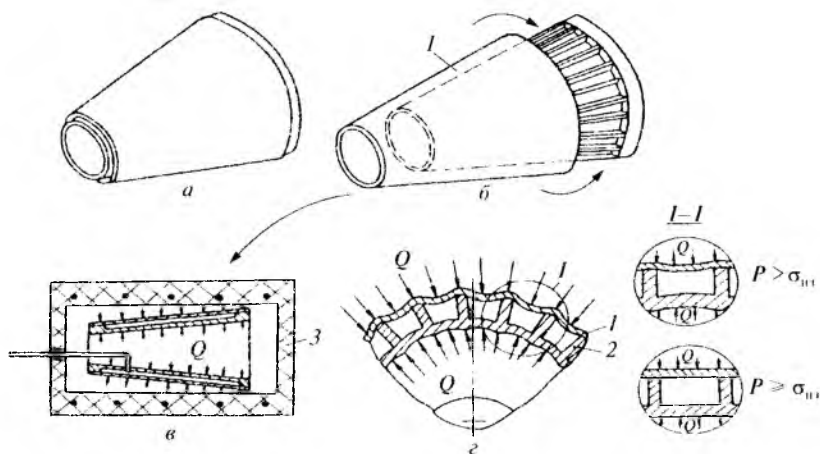


Рис. 5.46. Технологическая схема диффузионной сварки с низкоинтенсивным силовым воздействием конструкций сложной формы:

а — требуемая конструкция; *б* — заготовки для сварки; *в* — сварка; *г* — характер деформации элементов конструкции при сварке; *1* — внешняя оболочка; *2* — внутренняя оболочка

В ряде случаев можно не применять внешнее давление для сжатия свариваемых заготовок, а использовать явление термического напряжения, возникающего при нагреве материалов с различными коэффициентами линейного расширения. При сварке коаксиально собранных заготовок коэффициент линейного расширения охватывающей детали должен быть меньше, чем у охватываемой детали (рис. 5.46, б).

Качество соединения при диффузионной сварке в вакууме определяется комплексом технологических параметров, основными из которых выступают температура, давление, время выдержки.

Диффузионные процессы, лежащие в основе формирования сварного соединения, являются термически активируемы

ми, поэтому повышение температуры сварки стимулирует их развитие.

Для снижения сжимающего давления и уменьшения длительности сварки температуру нагрева свариваемых деталей целесообразно устанавливать по возможности более высокой, металлы при этом обладают меньшим сопротивлением пластической деформации.

Вместе с тем необходимо учитывать возможность развития процессов структурного превращения, гетеродиффузии, образования эвтектик и т.д., приводящих к изменению физико-механических свойств свариваемых металлов.

Удельное давление влияет на скорость образования диффузионного соединения и накопленную деформацию свариваемых заготовок. В большинстве случаев чем выше удельное давление, тем меньше время сварки и больше деформация. Например, при сварке в прессе с использованием высоких удельных давлений (до нескольких десятков мегапаскалей) время образования соединения может измеряться секундами, а деформация металла в зоне соединения десятками процентов. При сварке с использованием низких удельных давлений (десятые доли мегапаскаля) время сварки может исчисляться часами, но деформация соединяемых заготовок при этом составляет доли процента. Таким образом, задача выбора удельного давления должна решаться с учетом типа конструкций, технологической схемы и геометрических размеров соединяемых заготовок. Время сварки выбирается с учетом температуры и удельного давления.

При сварке разнородных материалов увеличение длительности сварки может сопровождаться снижением механических характеристик соединения из-за развития процессов гетеродиффузии, приводящих к формированию в зоне соединения хрупких интерметаллидных фаз.

Сегодня для осуществления диффузионной сварки используется свыше 70 типов сварочных диффузионно-вакуумных установок. Совершенствование установок ведется в направлении унифицирования систем (вакуумной, нагрева, давления, управления) и сварочных камер. Меняя камеру в этих установках, можно значительно расширить номенклатуру свариваемых узлов.

Некоторые виды конструкций, изготовленных диффузионной сваркой, приведены на рис. 5.47.

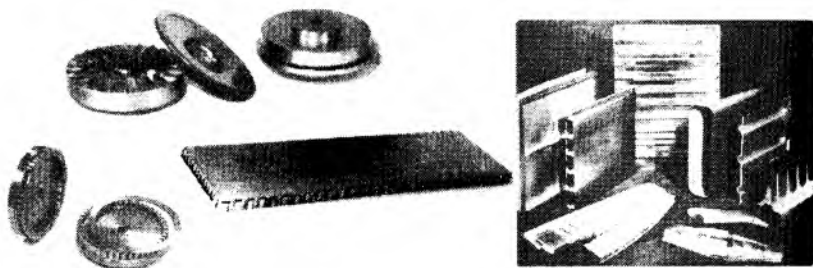


Рис. 5.47. Примеры титановых конструкций, изготовленных диффузионной сваркой

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как происходит образование соединения при сварке токами высокой частоты?
2. Как образуются соединения при холодной сварке?
3. Как происходит образование соединения при сварке взрывом?
4. С какой целью при сварке взрывом разнородных материалов используют промежуточные прослойки?
5. За счет чего достигается нагрев свариваемых заготовок при сварке трением?
6. В чем сущность процесса сварки трением с перемешиванием?
7. В чем сущность процесса ультразвуковой сварки и в какой области она применяется?
8. Чем отличается сварка прокаткой от диффузионной сварки?
9. Что служит источником теплоты при термитной сварке?

ГЛАВА 6 ПРОЦЕССЫ, РОДСТВЕННЫЕ СВАРКЕ

6.1. Соединение пластмасс

В настоящее время пластмассы используются практически во всех областях — в машиностроении, строительстве, приборостроении, радиоэлектронике, пищевой промышленности, медицине и т.д. Из пластмасс изготавливают подшипники скольжения, зубчатые и червячные колеса, технологическую оснастку, детали транспортных средств, защитные оболочки, трубопроводы.

Некоторые способы сварки пластмасс аналогичны способам сварки металлов или схожи с ними по своей сущности (например, сварка нагретыми газами, трением), однако имеют определенные особенности. Другие способы сварки характерны исключительно для соединения полимеров.

При изготовлении сварных конструкций наиболее широко применяют листы, трубы и пленки из термопластичных полимеров — полиамидов, полиолефинов, хлор- и фторсодержащих полимеров и сополимеров, полиакрилатов, полистирола, поликарбонатов, полиэтилентерефталата и др.

Классификация и механизм сварки пластмасс. Способы сварки пластмасс подразделяют на две большие группы: основанные на передаче теплоты свариваемому материалу от внешнего теплоносителя — сварка газовым теплоносителем, экструдированной присадкой, нагретым инструментом, когда теплота передается к свариваемым поверхностям за счет конвекции, теплопроводности, и частично лучеиспускания; основанные на преобразовании в теплоту энергии, вводимой в зону соединения, — сварка ультразвуком, трением (вращением и вибротрением), инфракрасным излучением, лазером, нейтронным облучением, за счет термохимической реакции, когда

теплота генерируется внутри пластмассы при преобразовании различных видов энергии.

Существуют также способы сварки *без подвода тепловой энергии* (при комнатной температуре):

- ◇ холодная сварка, когда соединение происходит за счет пластической деформации и течения материала под действием давления;
- ◇ сварка с помощью растворителей — размягчение пластмасс и приложение давления (соединение за счет протекания диффузионных процессов).

При *химической сварке* соединение образуется путем нагрева и введения в зону контакта веществ, инициирующих образование химических связей. В основе химической сварки лежит процесс образования химических связей между макромолекулами.

При соединении термопластичных пластмасс под воздействием температуры и давления происходит процесс самослипания (аутогезия).

Сварка происходит главным образом вследствие диффузии частей молекулярных цепей из одного объема пластмассы в другой, в результате чего продиффундировавшие макромолекулы соединяют оба объема и обеспечивают между ними прочную связь.

Механизм образования сварных соединений термопластов в состоянии расплава включает два этапа. На первом этапе происходит макроскопическое течение полимера. При этом из зоны контакта вытесняются ингредиенты, препятствующие взаимодействию макромолекул (газовая прослойка, окисленные и дефектные слои), и возможно перемешивание расплава. На втором этапе между сблизившимися макромолекулами возникает ван-дер-ваальсово взаимодействие (аутогезия), включая взаимную диффузию, обусловленную энергетическим потенциалом и неравномерностью теплового поля в месте соединения.

При сварке термопластов, так же как и при сварке металлов, протекают следующие процессы:

- ◇ преобразование энергии, обеспечивающей активацию свариваемых поверхностей;
- ◇ взаимодействие активированных поверхностей при их контакте;
- ◇ формирование структуры материала в зоне контакта.

Последовательность операций может быть различной: свариваемые материалы вначале приводят в плотный контакт, а затем происходит активация соединяемых поверхностей; соединяемые поверхности вначале подвергают активации, а затем обеспечивают их контакт; контактирование и активацию соединяемых поверхностей осуществляют одновременно.

Процесс сварки пластмасс может происходить лишь при определенных условиях — повышенной температуре в месте сварки (температура вязкотекучего состояния), плотном контакте свариваемых поверхностей и оптимальном времени процесса.

При *сварке газовыми теплоносителями (нагретыми газами)* кромки изделия нагревают подогретыми газами (воздухом, аргоном и др.) или непосредственно продуктами горения газа (ацетилен, водорода и т.д.) в воздухе. При сварке окисляющихся пластмасс используются инертные газы.

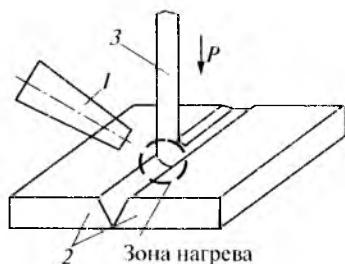


Рис. 6.1. Ручная сварка газовыми теплоносителями с присадочным материалом:

1 — мундштук; 2 — свариваемые детали; 3 — присадочный пруток

Сварка с применением присадочного материала (рис. 6.1) подобна ручной газовой сварке металлов. Нагрев свариваемых кромок происходит за счет теплоотдачи от нагретого газа, который подается из мундштука горелки 1 и нагревает кромки свариваемых деталей 2 и прутки 3 до вязкотекучего состояния. При надавливании на прутки последние привариваются к размягченным кромкам, образуя сварной шов.

При *сварке без присадочного материала* (рис. 6.2) кромки свариваемых деталей 1 предварительно скашивают «на ус», затем укладывают под сварку и равномерно нагревают подогретым газом. Непосредственно за струей нагретого газа следуют ролики 2, обжимающие стык.

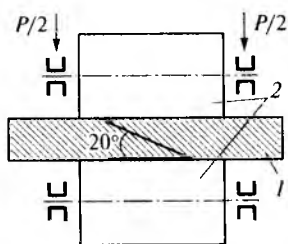


Рис. 6.2. Сварка газовыми теплоносителями без присадочного материала:

1 – свариваемые листы; 2 – ролики

Способ сварки нагретыми газами универсален и гибок, может быть применен для сварки материалов различных толщин, позволяет осуществлять сварку протяженных швов сложной конфигурации при их различном положении в пространстве, не требует сложного оборудования. Однако он характеризуется невысокой прочностью и пониженной пластичностью шва и околошовной зоны; низкой производительностью, особенно при сварке деталей большой толщины; возможностью перегрева материала. Сварка без присадочного материала отличается более высокой производительностью процесса, лучшими механическими свойствами соединений. Беспрутковую сварку чаще применяют при соединении пленочных материалов и мягких термопластов внахлестку.

Основные *параметры режима* сварки пластмасс газовыми теплоносителями: температура, давление и расход газа; усилие, прикладываемое к прутку; скорость укладки присадочного материала в разделку шва (скорость сварки); в случае сварки без присадочного материала – усилие, прикладываемое к роликам, и скорость перемещения деталей (скорость сварки); положение присадочного прутка и наконечника горелки.

Свариваемые материалы – ПВХ, полиэтилен, полипропилен, полиоксиметилен, полиметилметакрилат, полиамиды, полиизобутилен, поликарбонат.

Горючий газ нельзя применять непосредственно для сварки пластмасс вследствие высокой температуры пламени, поэтому используют специальные горелки.

В зависимости от способа нагрева различают горелки электрические и газовые. В электрических горелках (рис. 6.3) газы нагревают электрическим нагревательным элементом, в газовых – газовым пламенем. В последнем случае возможен прямой способ нагрева, когда газ-теплоноситель смешивают с

продуктами горения горючего газа, косвенный, когда передача теплоты от продуктов горения к газу-теплоносителю происходит через стенку.

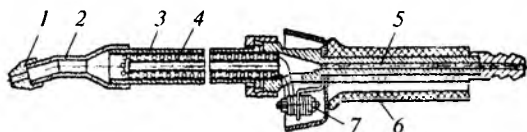


Рис. 6.3. Схема электрической горелки для сварки пластмасс:

1 — сопло; 2 — наконечник; 3 — стальная гильза; 4 — нагревательный элемент; 5 — трубка для подачи сжатого воздуха; 6 — ручка; 7 — зажимы

На рис. 6.4 представлен ручной сварочный аппарат «Хот-Джет» (компания «Leister», Швейцария) со встроенной подачей воздуха, регулировкой температуры и расхода воздуха, используемый в основном для сварки листов, пленок, кровельных и гидроизолирующих покрытий, ПВХ-ткани, пластмассовых деталей.



Рис. 6.4. Ручной сварочный аппарат «Хот-Джет»

Автомат «Универсал» (рис. 6.5) производства той же компании используется для сварки внахлестку тентовой ткани из ПВХ (при производстве автомобильных тентов, палаток, павильонов, шатров, защитных навесов, покрытий для бассейнов, воздушных и плавательных средств и т.д.), а также сварки полимерных кровельных покрытий толщиной до 2 мм.

В качестве горючих газов в газовых горелках (см. рис. 6.6) применяют водород, ацетилен, пропан.

Основным недостатком конструкций горелок с электрическим нагревом является то, что образующаяся на спиралях окисина уносится воздухом и частично попадает в шов, снижая его

прочность. Этот недостаток можно устранить заменой проволочной спирали трубчатым змеевиком из нержавеющей стали, к концам которого подведен электрический ток, а внутри движется нагретый газ.

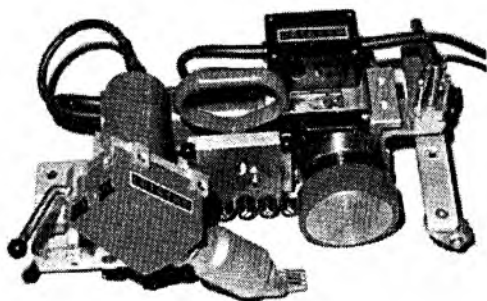


Рис. 6.5. Автомат «Универсал» (компания «Leister», Швейцария)

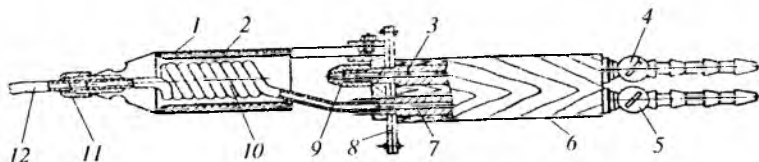


Рис. 6.6. Схема газовой горелки косвенного нагрева для сварки пластмасс:

1 — кожух; 2 — асбест; 3 — трубка для подачи горючего газа; 4, 5 — краны; 6 — ручка; 7 — трубка для подачи воздуха; 8 — шток; 9 — смесительное устройство; 10 — змеевик; 11 — гайка; 12 — наконечник

При сварке нагретым инструментом (контактно-тепловая сварка) источники нагрева — разогретые тела (элементы) — передают теплоту путем непосредственного соприкосновения с пластмассовыми заготовками. Этот способ имеет следующие разновидности:

- ♦ сварка оплавлением, когда нагреватель соприкасается непосредственно со свариваемыми поверхностями и переход термoplasta в вязкотекучее состояние происходит, начиная с поверхностей, подлежащих соединению, и в большинстве случаев сопровождается вытеканием расплава из-под нагревающего инструмента, т.е. соединяемые поверхности оплавляются;
- ♦ сварка проплавлением, когда теплота к свариваемым поверхностям поступает сквозь толщу свариваемых деталей, а инструмент контактирует с их внешними поверхностями. Нагрев может быть односторонним, используемым для сварки деталей

значительной толщины (листы, трубы, профиль), или двусторонним, который применяется для сварки внахлестку тонких листов и пленок. Нагретые инструменты имеют вид пластин, дисков, полос, нитей, профилированных планок.

При *прямом нагреве*, т.е. нагреве всего сечения свариваемых деталей, нагретую металлическую пластину *1* помещают между деталями *2*. После нагрева свариваемых поверхностей пластину быстро удаляют и сдавливают детали (рис. 6.7). Схватывание расплава с инструментом предотвращают, уменьшая время сварки и повышая температуру нагревателя. Этим методом сваривают встык и внахлестку одновременно всю поверхность соединения — профили и трубы из мягкого и твердого ПВХ, твердого полиэтилена, полипропилена, полиацетата.

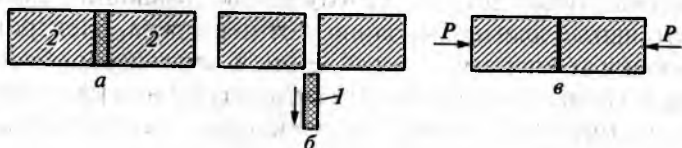


Рис. 6.7. Схема сварки нагретым инструментом:

а — нагрев поверхностей; *б* — удаление нагревательного элемента; *в* — приложение давления; *1* — нагретый инструмент; *2* — детали

Основные *технологические параметры* при сварке оплавлением — температура нагревательного элемента, продолжительность нагрева, усилие прижатия сварочного инструмента к деталям (давление оплавления), давление осадки, продолжительность выдержки под давлением после сварки, скорость оплавления, скорость и осадка.

Трубы диаметром более 50 мм соединяют встык, трубы диаметром менее 50 мм при толщине стенки 2 мм сваривают врасстроб. При стыковой сварке торцы труб нагревают плоским инструментом в форме диска для труб малого диаметра и в форме кольца для труб большого диаметра. Нагрев этих инструментов в зависимости от конструкции можно осуществлять встроенными электронагревателями или газовыми горелками.

Соединение врасстроб — это соединение с трубами фасонных деталей, полученных литьем под давлением.

При сварке врасстроб (рис. 6.8) нагревательный элемент имеет гильзу для оплавления конца трубы и дорн для оплавления

ния внутренней поверхности раструба. Дорн и раструб могут иметь цилиндрическую или коническую форму (конусность $1/16 - 1/12$).

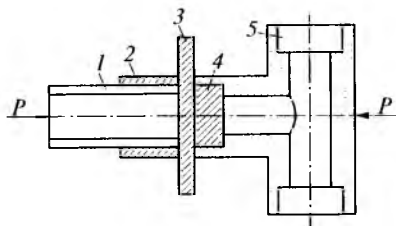


Рис. 6.8. Схема нагрева при сварке внахлест:

1 — пластмассовая труба; 2 — нагретая (сварочная) гильза; 3 — нагретый инструмент; 4 — нагретый (сварочный) дорн; 5 — пластмассовый фитинг

На рис. 6.9 показаны ручные аппараты Roweld HE (компания «Rothenberger», Германия) для контактно-тепловой сварки пластмассовых деталей (труб) встык, имеющие сменные нагревательные элементы, защиту от перегрева, электронную регулировку температуры, крепление к верстаку и обеспечивающие поддержание заданной температуры и ее равномерное распределение по всей поверхности нагревательного элемента.

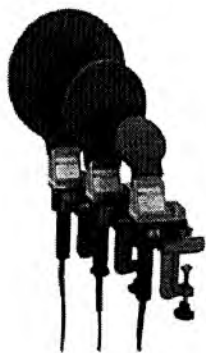


Рис. 6.9. Ручные аппараты для стыковой сварки пластмасс

Для сварки внахлест могут быть использованы аппараты Roweld P 63-3 Sets той же компании (рис. 6.10), снабженные насадками для сварки труб диаметром 16–125 мм, защитой от перегрева, электронной или термостатической регулировкой температуры, креплением к верстаку.

Сварка экструдированной присадкой (расплавом) — способ, основанный на подаче в место сварки присадки, находящейся в вязкотекучем состоянии. Нагретый присадочный материал расплавляет кромки свариваемой пластмассы, которая сваривается

вается с экструдированной присадкой. Возможен дополнительный нагрев кромок деталей газовыми теплоносителями. Этот метод похож на сварку нагретым воздухом. Во всех случаях сварное соединение образуется за счет сплавления присадочного материала с кромками соединяемых деталей, при этом полимер остается в вязкотекучем состоянии. Плотный контакт расплавленного присадочного материала с кромками свариваемых деталей обеспечивается соответствующим давлением.

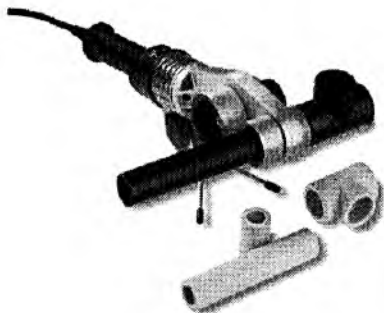


Рис. 6.10. Аппараты для сварки внахлест

Сварка экструдированной присадкой может быть выполнена по трем схемам.

1. Сварка открытой струей (экструзионной), когда присадочный материал непрерывно поступает в зону соединения из сопла экструдера, находящегося на некотором расстоянии. Для обеспечения плотного контакта присадочного материала с соединяемыми кромками применяют специальные прижимные устройства.

Экструзионную сварку целесообразно применять для сварки пластмасс, имеющих сравнительно невысокую температуру перехода в вязкотекучее состояние, широкий интервал вязкотекучего состояния и способных нагреваться при экструзии значительно выше температуры текучести без деформации.

2. Контактная-экструзионная сварка, когда нагретое сопло касается свариваемых кромок, дополнительно нагревая их (рис. 6.11), или расплав подается в зону сварки периодически. Таким способом соединяют штампованные детали, состоящие из двух половин. Сварку производят в собранном виде, в форме, кото-

рая имеет специальные каналы, расположенные вдоль линии разреза. По этим каналам продавливается расплав. При передаче части теплоты расплава детали плавятся и соединяются по линии разреза.

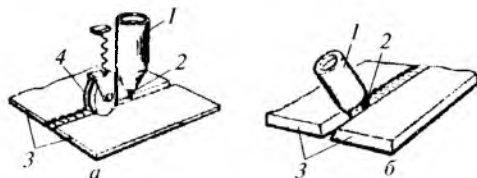


Рис. 6.11. Схемы сварки термопластов экструдированной присадкой:

а — экструзионная сварка; *б* — контактно-экструзионная сварка; 1 — экструдер; 2 — мундштук экструдера; 3 — свариваемые детали; 4 — прикатывающий ролик

Характерной особенностью контактно-экструзионной сварки является более высокая стабильность качества соединений, нечувствительность к состоянию поверхности материала.

3. Соединение полимерных пленок и пленочных армированных материалов непрерывным протяженным швом (рис. 6.12).

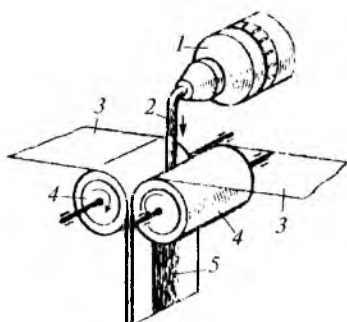


Рис. 6.12. Экструзионная сварка полимерных пленок:

1 — экструдер; 2 — присадка; 3 — свариваемые пленки; 4 — прижимные ролики; 5 — сваренные пленки

Ручной пистолет для сварки пластмасс экструдированной присадкой работает по принципу выдавливания плавящегося конца присадочного прутка, непрерывно толкаемого холодной его частью. Пистолет нагревается электрической спиралью. Присадочный пруток подается с помощью роликов, приводимых в движение электродвигателем. Фотографии экструдеров представлены на рис. 6.13, а их характеристики даны в табл. 6.1.

Таблица 6.1. Характеристики экструдеров компании «Dohle» (Германия)

Наименование характеристики		Модель	
		6000 PC	1500*
Вид присадочного материала		Гранулы	Прутки диаметром 3–4 мм
Тип подачи воздуха		Встроенная	Отдельная
Мощность, Вт	Нагревателя	3400	2000
	Двигателя	1600	620
Расход воздуха, л/мин		50/60	300
Температура воздуха, °C		20–600	20–650
Производительность, кг/ч		6	0,6–1,7
Свариваемые материалы		ПЭ, ПП**	ПЭ, ПП**
Масса, кг		11,0	4,8
* Цифровой индикатор и регулировка температуры полимерной массы.			
**ПЭ, ПП – полиэтилен, полипропилен.			

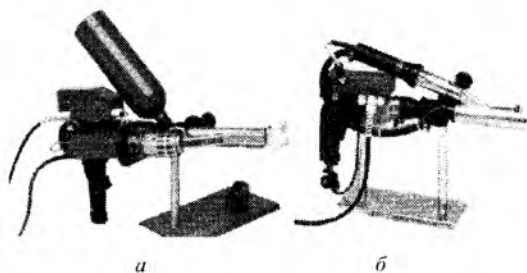


Рис. 6.13. Модели ручных экструдеров компании «Dohle» (Германия) для экструзионной сварки пластмасс:

а – модель 6000 PC;
б – модель 1500

Ультразвуковая (УЗ) сварка. Нагрев при УЗ-сварке обусловлен поглощением энергии механических колебаний в объеме материала, находящегося под волноводом, в свариваемом контакте и контакте полимерный материал–волновод. Выделение теплоты в объеме полимера обусловлено потерями на внутреннее трение. Наиболее интенсивно поглощение энергии происходит в отдельных несплошностях материала, максимальное скопление которых наблюдается на границе раздела соединяемых материалов, где из-за наличия микронеровностей возможны значительные динамические напряжения. Кроме того, возникающие при сварке поперечные УЗ-колебания вызывают поверхностное трение на границе раздела, что способствует

быстрому разогреву материала в этой зоне и его переходу в размягченное состояние. Образовавшаяся мягкая прослойка снижает коэффициент механического трения, однако интенсивно поглощает механические колебания.

Перечисленные процессы приводят к неравномерному выделению теплоты и распределению температуры в объеме материала. Максимальные температуры достигаются на соединяемых поверхностях, поэтому образование соединения при УЗ-сварке возможно без проплавления всего объема материала.

Под воздействием мощных импульсов УЗ-частоты происходит выравнивание микронеровностей, разрушаются и удаляются различные поверхностные пленки и загрязнения. УЗ-колебания ускоряют процесс диффузии макромолекул, вызывают интенсивное перемешивание расплава. Это обеспечивает качественные соединения при температурах более низких, чем при других известных способах сварки.

С помощью ультразвука сваривают: органическое стекло, ПВХ, полистирол, полиэтилен, синтетические ткани. Данный способ можно применять при сварке упаковочной тары, где места сварки загрязнены различными продуктами. Наиболее просто ультразвуком выполняются нахлесточные и тавровые точечные соединения. Сварка не требует разделки кромок и присадочного материала.

Применяют различные схемы УЗ-сварки (рис. 6.14).

Преимущества УЗ-сварки пластмасс состоят в следующем:

- ◇ для сварки не требуется второй электрод, так как процесс односторонний, поэтому вторая деталь может быть значительной толщины;
- ◇ имеется возможность сварки ультратонких деталей, листовых пакетов;
- ◇ УЗ-колебания можно вводить на значительном расстоянии от места соединения, что позволяет осуществлять сварку в труднодоступных местах;
- ◇ максимальный нагрев концентрируется на свариваемых поверхностях, что исключает перегрев пластмасс и обеспечивает высокую производительность процесса;
- ◇ загрязнения поверхности не оказывают заметного влияния на процесс сварки;
- ◇ к сварочному инструменту не подводится напряжение.

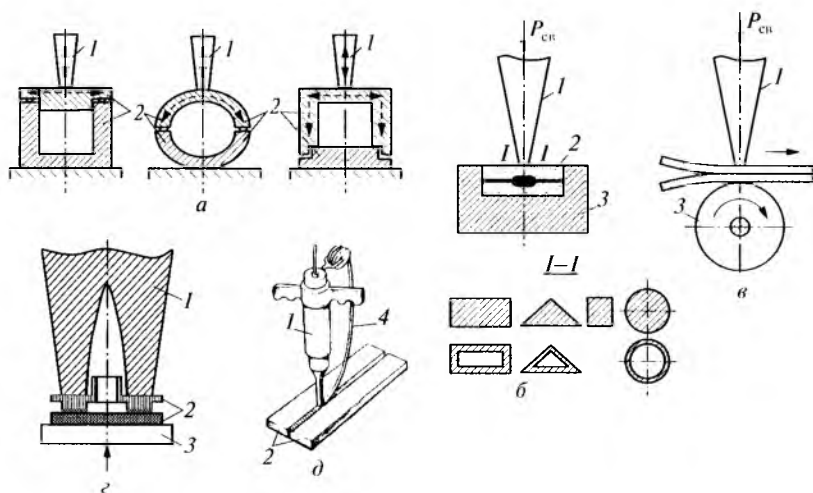


Рис. 6.14. Схемы УЗ-сварки:

а — передаточная; *б* — контактная прессовая; *в* — контактная шовная; *г* — прессовая;
д — с дополнительной присадкой; 1 — волновод; 2 — свариваемые детали; 3 — опора;
 4 — присадочный материал

6.2. Пайка

Широкое применение пайки, особенно в машиностроении, электронике и электротехнической промышленности, объясняется, во-первых, тем, что пайка как процесс формирования соединений материалов осуществляется при температурах ниже температуры начала плавления паяемого материала и характеризуется возможностью автоматического ее регулирования, во-вторых, все большим внедрением в производство новых конструкционных материалов и переходом на высоколегированные сплавы, сварка которых связана со значительными трудностями.

Сущность пайки заключается в следующем: создается жидкая прослойка из расплавленного припоя между паяемыми твердыми поверхностями, которая смачивает поверхности, растекаясь в тонком зазоре между паяемыми деталями, а после кристаллизации образует паяный шов, где между поверхностями

ными атомами (ионами) соединяемых заготовок и припоя формируются химические (металлические) связи.

Процесс пайки осложняется из-за наличия на поверхности металлов оксидных и других слоев, препятствующих растеканию припоя по зазору между деталями. Кроме того, жидкий металл припоя подвергается окислению с поверхности и не растекается по паяемым металлическим поверхностям, в результате чего получается дефект соединения — непропай.

Только такие металлы, как золото и отчасти серебро, можно паять без применения флюсов для снятия оксидных слоев. Это свойство золота используют в приборостроении: поверхности изделия сначала покрывают тонким слоем золота, а потом паяют. Такой метод весьма дорогой, и его применяют, например, в производстве полупроводниковых приборов (микросхем).

Соединяемые поверхности при пайке активируют при помощи флюсов — веществ, растворяющих оксиды металлов или хотя бы нарушающих сплошность их слоя для того, чтобы припой смог проникнуть под них, смачивая чистый металл. Для этой цели применяют нашатырь NH_4Cl , буру $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ или смеси хлоридов активных металлов, образующих легкоплавкие системы. После пайки следы применявшихся флюсов тщательно удаляют, так как может возникнуть коррозия и паяное соединение будет разрушаться.

Однако флюсы не удаляют с паяемых заготовок посторонние вещества органического и неорганического происхождения, например пленки жирового происхождения, загрязнения, остатки лакокрасочных покрытий и т.п. В процессе пайки они препятствуют смачиванию основного металла флюсом и припоем, вызывают непропаи. Поэтому посторонние вещества с соединяемых поверхностей деталей и припоя перед пайкой приходится удалять химической или механической обработкой.

Преимуществами флюсовой пайки можно назвать возможность осуществлять процесс в обычной атмосфере, применять универсальное оборудование и инструмент (газопламенные горелки, паяльники). Однако флюсовой пайке присущ ряд недостатков — агрессивность ряда флюсов, невозможность достаточно надежно удалять поверхностные оксиды некоторых металлов (например, оксиды титана); экологические проблемы — загрязнение атмосферы и сточных вод. В связи с этим

предпочтительной следует считать пайку без флюсов — в контролируемых атмосферах — вакууме, аргоне, гелии.

В последнее время разрабатывают самофлюсующиеся припои, которые при высоких температурах пайки могут растворять свои оксиды, отнимая тем самым кислород от оксидов, образовавшихся на поверхности металла. Такие припои содержат в качестве раскислителей бор, алюминий и другие активные элементы.

Оксидные пленки с поверхности металла удаляют с помощью УЗ-колебаний (рис. 6.15), нарушающих сплошность пленок, что часто используют на производстве, например при пайке алюминия УЗ-паяльниками. Паяльник имеет магнитостриктор 1, излучающий УЗ-колебания, передающиеся наконечнику 2. Возбужденные в расплавленном припое колеблющимся наконечником кавитационные пузырьки 4 эффективно разрушают оксидные пленки 3. Обмотка магнитостриктора подключается к высокочастотному генератору 6, вырабатывающему импульсы частотой 15–20 кГц. Наконечник нагревается спиралью 5, через которую пропускается электрический ток. При лужении наконечник располагается как можно ближе к детали, но не касается ее. Облуженные детали можно паять обычным электрическим паяльником без флюса с применением оловянно-цинковых или оловянно-свинцовых припоев.

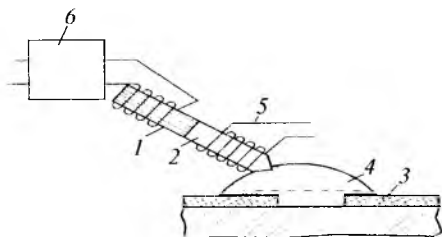


Рис. 6.15. Схема пайки УЗ-паяльником

При изготовлении паяных изделий необходимо добиться такого качества сборки под пайку, при котором гарантируются зазоры для заполнения их жидким припоем. Если зазоры велики, то припой не будет в них затекать и получатся непропаи, а если зазоры очень малы, то скорость проникновения в них жидкого металла будет очень мала и тоже могут получиться непропаи. Хорошее качество паяных соединений обеспе-

чивают оптимальные размеры зазоров, сборка по которым в производственных условиях составляет особые трудности, при широко применяемой капиллярной пайке используют способность жидкостей самопроизвольно подниматься в тонкие капилляры или плоские щели за счет сил поверхностного натяжения при наличии смачивания жидкостью твердой поверхности. На рис. 6.16 приведена схема смачивания при пайке, т.е. взаимодействия жидкости с твердой поверхностью щели или капилляра в зависимости от угла смачивания θ .

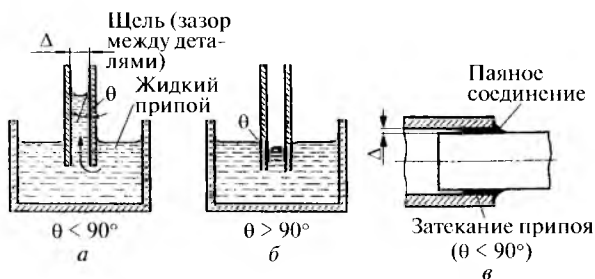


Рис. 6.16. Взаимодействие жидкого припоя с твердой поверхностью щели или капилляра:

a — при наличии смачивания; *б* — в его отсутствие; *в* — схема образования паяного соединения

При пайке изделий, собранных с некапиллярным или неравномерным зазором, для удержания жидкой фазы припоя в зазоре и управления его растеканием по поверхности используют композиционные припои, которые содержат наполнитель для образования в паяльном зазоре системы капилляров. Такие припои получают, в частности, спеканием порошка или волокон тугоплавкого материала с последующей пропиткой жидкой легкоплавкой фазой (рис. 6.17).

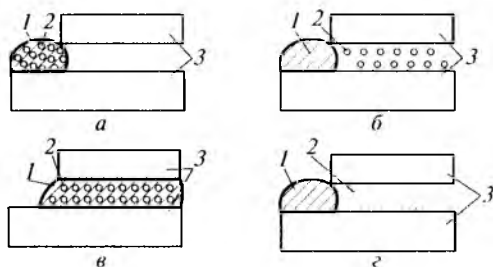


Рис. 6.17. Примеры размещения наполнителя 2 и легкоплавкой составляющей 1 композиционного припоя между паяемыми пластинами 3

Контактно-реактивная пайка применяется для соединения разнородных металлов, например титана со сталью, алюминия с медью и т.д. Эта пайка основана на способности некоторых металлов образовывать в месте контакта сплавы (эвтектики или твердые растворы), температура плавления которых ниже температуры плавления любого из соединяемых металлов. Если соединяемые металлы не образуют между собой подобные сплавы, а также при пайке однородных металлов используют промежуточную прослойку или на соединяемые поверхности наносят покрытие напылением, гальваническим либо каким-то другим способом. Металл прослойки или покрытия подбирается так, чтобы он взаимодействовал с каждым из соединяемых металлов, образуя более легкоплавкие сплавы — эвтектики — твердые растворы с минимумом на диаграмме состояния (рис. 6.18).

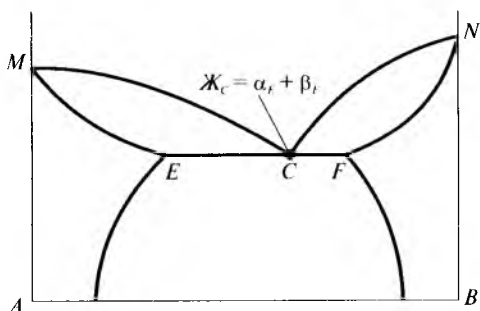


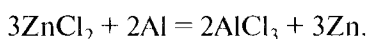
Рис. 6.18. Диаграмма состояния сплава с эвтектикой

Процесс плавления начинается с образования физического контакта между соединяемыми поверхностями по активным центрам. В них в твердом состоянии происходит взаимная диффузия металлов и непрерывно изменяется их концентрация в точке контакта. При некоторой температуре и образуется зона расплава, которая будет увеличиваться и растворять в своем объеме взаимодействующие металлы. Число таких контактов будет возрастать по мере осуществления процесса пайки.

При контактно-реактивной пайке детали сдавливают, что создает лучший физический контакт между деталями и способствует удалению избытка жидкой фазы, вместе с которой удаляются частицы оксидов, ухудшающие прочность паяного

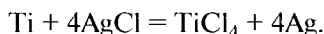
шва. Отметим, что жидкая прослойка, образующаяся при контактно-реактивной пайке, более активна, чем вносимый в зазор готовый припой: она лучше смачивает основной металл и более интенсивно его растворяет.

При *реактивно-флюсовой пайке* припой образуется в результате восстановления металлов из компонентов флюса. Например, пайка алюминия флюсом из хлористого цинка основана на способности алюминия вытеснять цинк из расплавленной соли при температуре 400 °С:



Образовавшийся цинк и является припоем, соединяющим детали из алюминия.

В ряде случаев продукт взаимодействия основного металла с флюсом не является припоем, однако он покрывает поверхность в месте пайки и улучшает смачиваемость дополнительного припоя, который вводится в зазор. Например, с помощью флюса AgCl можно осуществлять реактивно-флюсовое лужение (покрытие) титана серебром:



При температуре 350–400 °С хлорид титана в виде газа улетучивается с поверхности титана, разрушая при этом оксидную пленку TiO_2 , а восстановленное серебро покрывает чистую поверхность титана, которую затем можно подвергать пайке другими методами.

У паяных соединений остаточные напряжения очень малы, так как все изделие подвергается одновременно нагреву и охлаждению. Однако довольно длительный термический цикл пайки нагрев–выдержка–охлаждение может разупрочнять основной металл изделия, особенно при высокотемпературной пайке (1000–1200 °С).

В машиностроении и приборостроении пайку применяют очень широко — от пайки узлов реактивных двигателей (рис. 6.19) и до микромодульных схем современных элементов электроники (рис. 6.20). В последнее время пайку стали использовать и в строительстве — при соединении оцинкованных труб и листов, мачт линий электропередачи и т.д.

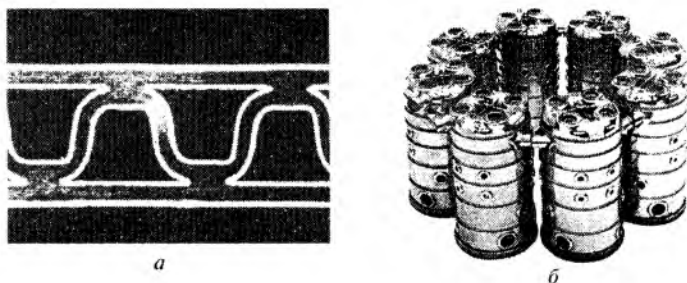


Рис. 6.19. Зона паяного соединения (а) и общий вид блока камер сгорания двигателя (б)



Рис. 6.20. Паяные изделия электронной техники

6.3. Наплавка и напыление

Процессы наплавки занимают важное место в сварочном производстве — при ремонте и восстановлении первоначальных размеров изношенных деталей, при изготовле-

нии новых изделий с целью получения поверхностных слоев, обладающих повышенной твердостью, износостойкостью, жаропрочностью, кислотостойкостью и другими специальными свойствами.

Наплавка осуществляется нанесением расплавленного металла на поверхность изделия, нагретую до температуры оплавления или температуры надежного смачивания жидким наплавляемым металлом. В результате взаимодействия расплавленного металла с оплавленной (или достаточно подогретой) поверхностью детали между ними образуются металлические связи. Толщина наплавленного металла бывает различной — от 0,5 до 10 мм и более. Такие слои можно наносить на наружные поверхности деталей, например валы, валки прокатного оборудования и др. (рис. 6.21, *а*), или на внутренние поверхности изделий — корпуса химических и энергетических реакторов, оборудование химических производств и др. (рис. 6.21, *б*).

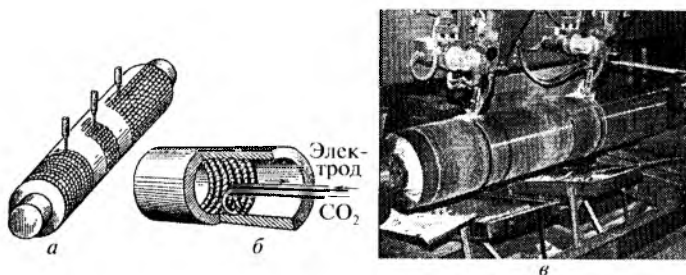


Рис. 6.21. Схемы наплавки в защитном газе цилиндрических наружных (*а*) и внутренних (*б*) поверхностей и общий вид автоматической наплавки под флюсом (*в*)

Благодаря наплавке значительно увеличивается срок службы деталей и сокращаются расходы дефицитных материалов на их изготовление. Например, когда все изделие изготавливается из более дешевого и достаточно работоспособного металла для конкретных условий эксплуатации, а на поверхности, работающие в особых условиях, наплавляется необходимый по толщине слой другого материала. В таком случае для изготовления деталей обычно применяют относительно простые и дешевые материалы (например, низкоуглеродистые стали), а на рабочие поверхности наплавляют бронзу, заменяя тем самым целиком бронзовую деталь.

При восстановлении (ремонте) деталей наплавку выполняют тем же или близким по составу металлом, из которого изготовлено изделие. При наплавке однородных металлов получение качественного соединения между наплавленным и основным металлом не вызывает затруднений. Однако при наплавке материалов, значительно отличающихся по химическому составу от материала основы, получить качественное соединение весьма сложно.

При наплавке поверхностных слоев с заданными свойствами должен выполняться ряд требований. Во-первых, минимальное разбавление наплавленного слоя основным металлом, расплавленным при наложении валиков, т.е. в процессе наплавки необходимо получить наплавленный слой с минимальным проплавлением основного металла, так как в противном случае возрастает доля основного металла в наплавленном слое. С этой целью наплавку проводят с небольшим шагом (рис. 6.22).

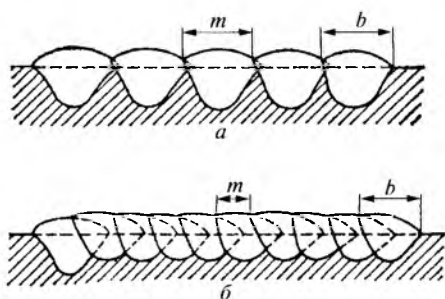


Рис. 6.22. Влияние шага наплавки на долю основного металла в поверхностном слое: *a* – большой шаг; *б* – малый шаг; *m* – шаг наплавки; *b* – ширина валика

Во-вторых, при наплавке необходимо обеспечить минимальную зону термического влияния, а также минимальные остаточные напряжения и деформации. При наплавке разнородных материалов (например, высоколегированных мартенситных, аустенитных сталей на низкоуглеродистые) возможно образование хрупких прослоек промежуточного состава, зон с выделением твердых и малопластичных интерметаллидов, зон с охрупченными границами зерен и т.п. При наличии таких прослоек возможны хрупкие разрушения – образование трещин, отслаивание наплавленного металла от основного еще в процессе изготовления изделия.

Чтобы исключить эти дефекты, нужно применять усложненную технологию: предварительно подбирать и наплавлять подслоу (промежуточный слой) из другого металла, который образует твердые растворы как с основным металлом, так и с наплавляемыми.

Иногда необходимость подслоа может вызываться и другими причинами. Например, при эксплуатации наплавленной детали в условиях частых теплосмен в зоне сплавления основного и наплавленного металлов, имеющих различные коэффициенты линейного расширения, могут возникать большие термические напряжения, вызывающие после воздействия определенного числа циклов разрушения в результате термической усталости. В этом случае целесообразно на основной металл предварительно наплавлять подслоу с промежуточным значением коэффициента линейного расширения.

Как источник теплоты можно использовать ацетилено-кислородное пламя (при этом процесс наплавки будет аналогичен процессу сварки, см. рис. 2.11, а); теплоту, выделяющуюся при протекании электрического тока по расплавленному шлаку (рис. 6.23); электрическую дугу (рис. 6.24).

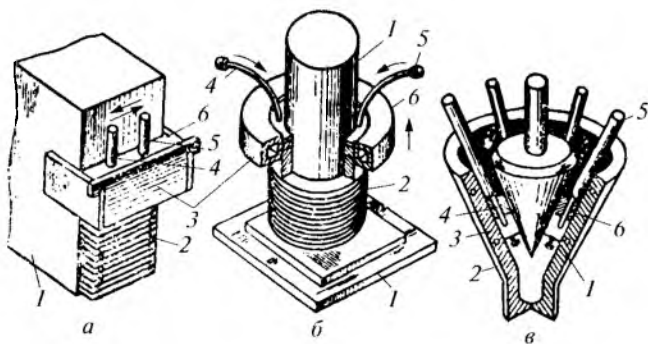


Рис. 6.23. Электрошлаковая наплавка поверхностей:

а — плоской; б — цилиндрической; в — конической; 1 — наплавляемая деталь; 2 — наплавленный слой; 3 — формирующее устройство; 4 — электроды; 5 — токоподвод; 6 — жидкий шлак

В качестве материалов для наплавки применяют порошки, покрытые электроды, порошковые проволоки, проволоку и ленту сплошного сечения, литые прутки.

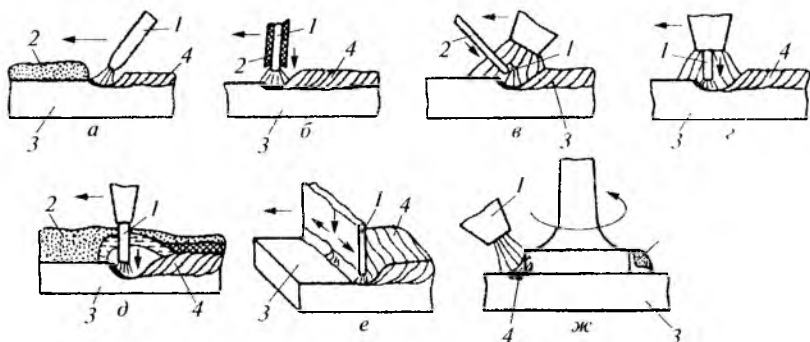


Рис. 6.24. Схемы основных способов дуговой наплавки:

а — угольным (графитовым) электродом *1* расплавлением сыпучего зернистого наплавочного сплава *2*; *б* — ручной дуговой покрытым электродом *1* с легирующим покрытием *2*; *в* — неплавящимся вольфрамовым электродом *1* в защитных инертных газах с подаваемым в дугу присадочным пруток *2*; *г* — плавящимся электродом проволокой *1* в защитных (инертных, активных) газах; *д* — механизированная (автоматическая, полуавтоматическая) дуговая плавящейся электродной (обычно легированной) проволокой *1* под флюсом *2*; *е* — плавящейся лентой *1* катаной, литой или прессованной из порошков в защитных газах или под флюсом; *ж* — расплавлением плазменной струей плазмотрона *1* предварительно наложенного литого или спеченного из порошков кольца *2* наплавочного материала; *3* — наплавляемое изделие; *4* — наплавленный металл

Для защиты нагретого и расплавленного металла от взаимодействия с воздухом служат флюсы и защитные газы (активные и инертные).

В ряде случаев качество наплавленного слоя и зоны его соединения с основным материалом может быть повышено за счет термической обработки. Например, предварительный, или сопутствующий, нагрев применяют при наплавке сталей, склонных к закалке и образованию трещин, что снижает вероятность получения хрупких подкаленных зон в металле детали или хрупком наплавленном слое. Последующая термообработка обычно применяется для снижения внутренних напряжений и выравнивания микроструктуры.

Если для металла или зоны соединения нежелательно длительное пребывание при высоких температурах, рекомендуются интенсифицировать охлаждение наплавляемой детали.

Таким образом, при наплавке в каждом конкретном случае необходимо комплексно решать ряд сложных вопросов: выбор материала, обеспечивающего соответствующие условиям экс-

плуатации свойства; возможность наплавки этого материала непосредственно на основной металл детали или подбор материала для наплавки подслоя; выбор способа и режима наплавки; выбор термического режима для выполнения наплавки.

Напыление (металлизацию) используют для защиты поверхностей детали от коррозии, упрочнения поверхности, защиты от абразивного износа, для восстановления изношенных деталей и т.п. При напылении основной металл не расплавляется и толщина наносимого слоя значительно меньше толщины слоя, получаемого наплавкой: обычно он составляет 0,2–0,3 мм.

Процесс напыления протекает следующим образом. В распылительную головку газометаллизационного аппарата непрерывно подается металлическая проволока напыляемого металла или порошок неметаллического материала, который расплавляется или ацетилено-кислородным пламенем, или электрической дугой косвенного действия, горячей между двумя проволоками-электродами, или сжатой дугой при плазменном напылении.

Расплавленный металл струей продуктов сгорания и воздуха, выходящей из сопла головки со скоростью до 200 м/с, распыляется и в виде частиц размером 10–150 мкм наносится на поверхность металлизированной детали (рис. 6.25). Благодаря большой скорости частицы достигают поверхности детали в жидком или пластическом состоянии и внедряются в эту поверхность, прочно сцепляются с ней, образуя металлизационный (напыленный) слой.

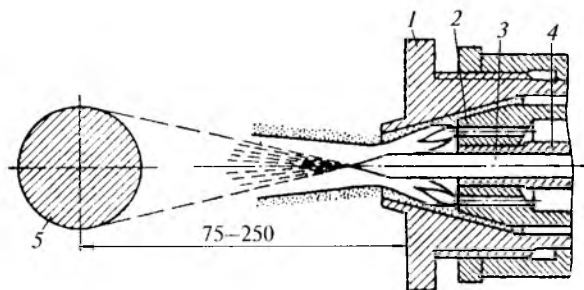


Рис. 6.25. Схема работы распылительной головки газометаллизационного аппарата
1 — наружное сопло для подачи воздуха; 2 — мундштук для подачи газа; 3 — проволока;
4 — сопло для подачи проволоки; 5 — деталь

Общий вид электродугового металлатора и ручной электродуговой пистолет показаны на рис. 6.26.

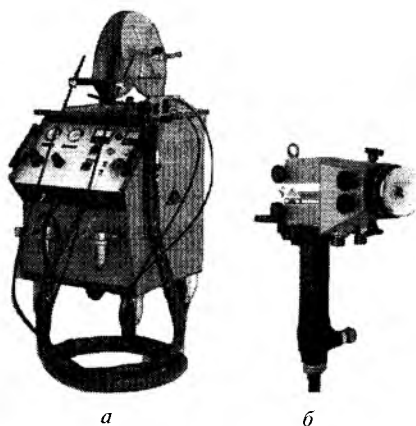


Рис. 6.26. Общий вид электродугового металлатора (а) и ручной электродуговой пистолет с механизмом подачи проволоки (б)

В настоящее время в технике широко используется плазменное напыление, преимуществами которого являются: возможность напыления тугоплавких и порошковых материалов, высокая производительность при напылении керамических материалов.

При плазменном напылении поверхность не следует перегревать выше $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, чтобы не возникли внутренние напряжения, способные привести к разрушению покрытия. Для предупреждения перегрева поверхность около места напыления охлаждают сжатым воздухом, поток которого направляют на покрытие с помощью дополнительного кольцевого сопла, окружающего мунштук горелки.

Плазменные покрытия используют в качестве электроизоляционных, например при изготовлении МГД-генераторов, теплообменников, тензодатчиков, дисков электропил и т.п., в ракетной технике для нанесения жаропрочных покрытий. Для повышения прочности сцепления керамических покрытий с основным металлом их напыляют на подслоу. При напылении оксида алюминия в качестве материала подслоя используют титан.

6.4. Резка металлов и неметаллических материалов

В настоящее время изготавливают сотни тысяч тонн сварных конструкций, сварочное производство которых невозможно без процессов разделительной резки металлов, необходимой для изготовления заготовок конструкций.

К термической резке металлов относят технологические процессы, при которых отделение частей разрезаемой заготовки (листа, профиля, поковки, отливки) осуществляют посредством концентрированного нагрева, создаваемого различными источниками теплоты. В заготовительном производстве широко применяются газовая и электрическая дуговая резка металлов.

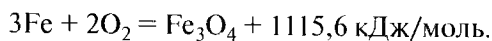
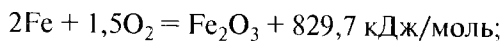
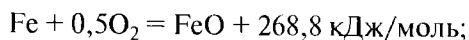
В табл. 6.2 приведены основные области применения различных способов термической резки.

Таблица 6.2. Области применения различных способов термической резки

Способ резки	Разрезаемый материал	Диапазон разрезаемых толщин, мм
Кислородная	Углеродистые и низколегированные стали	3–1000
	Титан и его сплавы	4–100
Кислородно-флюсовая	Высоколегированные, хромоникелевые (коррозионно-стойкие) и хромистые стали, чугун, медь, латунь, бронза и др.	4–1000
Плазменная	Конструкционные стали всех марок	1–40
	Коррозионно-стойкие стали	3–70
	Алюминий	3–80
	Медь, латунь	2–70
Лазерная	Конструкционные стали всех марок, коррозионно-стойкие стали, титан, медь, латунь и др.	1–10
Электродуговая с воздухом	Углеродистые и низколегированные стали при разделительной и поверхностной резке	—
Электродуговая с кислородом	Все марки стали, включая высоколегированные, хромистые и хромоникелевые при поверхностной резке	—

Способ резки выбирают с учетом толщины металлопроката, требуемой точности и качества резки, экономичности способа резки в каждом конкретном случае, а также имеющегося оборудования. Считается, что при резке низкоуглеродистых и низколегированных сталей наиболее целесообразно использовать кислородную резку для раскроя проката толщиной свыше 30 мм, плазменную — 10–40 мм, а лазерную — до 10 мм.

Кислородная резка металлов основана на сгорании (интенсивном окислении) металлов в струе кислорода и принудительном удалении этой струей образующихся оксидов (шлаков). Хорошо известно, что большинство металлов при контакте с кислородосодержащими средами окисляется и этот процесс идет с выделением теплоты. Так, окисление железа протекает согласно реакциям:



Интенсивность окисления возрастает с увеличением концентрации кислорода в газе и повышением температуры. В технически чистом кислороде (чистотой 98–99 %) при некоторой начальной температуре интенсивность окисления становится очень большой и переходит в горение.

Непрерывность горения достигается при выполнении следующих условий:

контакт окислителя с неокисленным металлом;

подогрев неокисленного металла до температуры воспламенения;

высокая концентрация кислорода в газовой фазе, взаимодействующей со сжигаемым металлом;

температура горения металла ниже температуры его плавления;

жидкое состояние продуктов горения (оксидов), так как твердые продукты горения будут изолировать неокисленный металл от окислительной газовой фазы, а газообразные продукты горения приведут к уменьшению концентрации кислорода в газовой фазе.

Процессу резки благоприятствуют: повышенное количество теплоты, выделяющейся при сгорании металла, и жидкотекучесть образующихся оксидов, а препятствует высокая теплопроводность металла, понижающая его температуру в месте протекания реакции горения.

Из чистых металлов этим требованиям отвечают железо, марганец и титан. Хорошими характеристиками обладают никель и медь. Совершенно не удовлетворяют требованиям непрерывной резки алюминий, магний, хром, цинк.

Для начала процесса резки низкоуглеродистая сталь должна быть нагрета до температуры 1350—1360 °С. В момент начала газовой резки подогрев металла в начальной точке реза до воспламенения осуществляется исключительно теплотой подогревающего пламени, обычно ацетилено-кислородного. При прямой молинейной резке стали малой толщины (менее 5 мм) применяют резаки с последовательным расположением сопел (рис. 6.27, а), а при резке больших толщин используют мундштуки, в которых подогревающее пламя образуется на выходе горючей смеси из мундштука с кольцевым щелевым каналом (рис. 6.27, б) или из многосоплового мундштука, имеющего несколько отдельных цилиндрических каналов, также расположенных по концентрической (по отношению к режущему соплу) окружности (рис. 6.27, в).

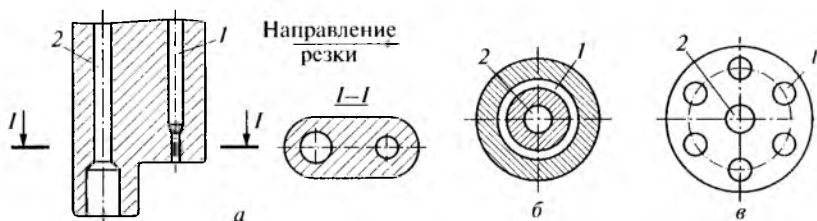


Рис. 6.27. Последовательность (а), форма (б) и расположение (в) подогревающих 1 и режущего 2 сопел

Длительность подогрева низкоуглеродистой стали зависит от толщины разрезаемого листа и с его увеличением от 5 до 200 мм возрастает с 5 до 40 с. После подогрева подается режущая струя кислорода и осуществляется процесс резки металла (рис. 6.28).

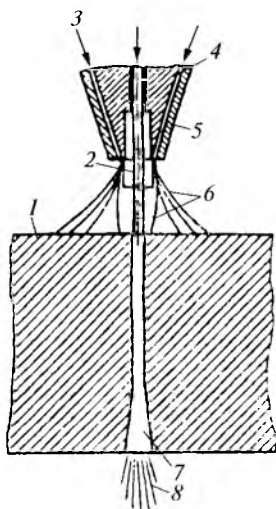


Рис. 6.28. Газокислородная резка: 1 — разрезаемый металл; 2 — струя режущего кислорода; 3 — горючая смесь; 4 — режущий мунштук; 5 — мунштук подогревающего пламени; 6 — подогревающее пламя; 7 — рез; 8 — шлаки

При разделительной кислородной резке с механизированным перемещением резака можно достичь таких точности и чистоты поверхности реза, что можно отказаться от дополнительной механической обработки (рис. 6.29).

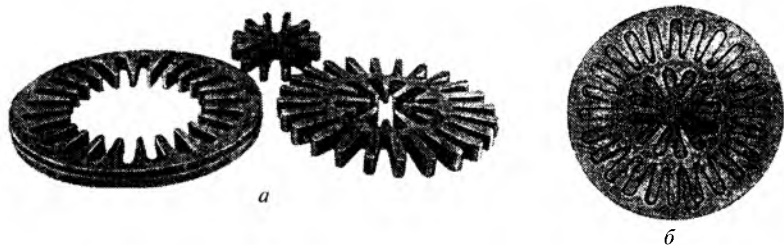


Рис. 6.29. Детали магнитной плиты:

а — после вырезки газокислородной резкой по копиру из одного листа в три прохода; б — в сборе

Основными достоинствами кислородной резки являются относительная простота и универсальность применяемого оборудования, высокая энергетическая и экономическая эффективность процесса при резке металлопроката толщиной более 30 мм, хорошее качество резов при использовании кислорода высокой чистоты и оптимальной скорости резки.

К недостаткам этого процесса следует отнести повышенные деформации заготовок и низкую скорость резки при обработке металлопроката толщиной до 30 мм, науглероживание кромок и склонность к образованию грата по мере снижения чистоты кислорода, большие валовые вредные выделения и необходимость использования энергоемких вентиляционных систем.

Кислородно-флюсовую резку используют при обработке высоколегированных, хромоникелевых (коррозионно-стойких) и хромистых сталей, чугуна, меди, латуни, бронзы и других сплавов, так как эти материалы не поддаются обычному процессу кислородной резки из-за образования тугоплавких оксидов и недостаточного теплового эффекта от сгорания металла.

При кислородно-флюсовой резке в кислородную режущую струю дополнительно вводятся порошкообразные флюсы на основе железного порошка, частицы которых, сгорая, дают значительный тепловой эффект, способствуя плавлению тугоплавких оксидов на поверхности контакта кислорода с обрабатываемым металлом без значительного расплавления кромок металла под этим поверхностным слоем.

В некоторых случаях удалению тугоплавких оксидов способствует абразивное действие частиц, увлекаемых потоком кислорода режущей струи. Так, применение для этой цели кварцевого песка позволяет удалять тугоплавкие оксиды хрома с поверхности реза при обработке высокохромистых сталей. Одновременно возможно и некоторое флюсование оксидов с образованием силикатов $\text{SiO}_2 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ и др.

Процесс кислородной резки неметаллов (бетона, шлака, огнеупоров) в отличие от резки металлов основан на сгорании в режущей струе кислорода металлических порошков, вводимых в зону резки, расплавлении выделенной теплотой неметаллов и последующем удалении расплава струей кислорода.

Источником теплоты при электрической резке служит электрическая дуга.

Дуговая резка угольным или металлическим электродом с покрытием основана на расплавлении металла электрической дугой и стекании расплавленного металла вниз под действием собственного веса (рис. 6.30). Резку производят при горизонтальном положении листов пилообразным движением электро-

да, что облегчает стекание жидкого металла. Этот способ применяют для резки чугуна, цветных металлов и сплавов. Рез при этом получается широким, с оплавленными торцами кромок.

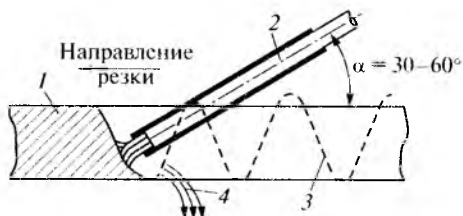


Рис. 6.30. Дуговая резка металлическим электродом: 1 — разрезаемый металл; 2 — металлический электрод с покрытием; 3 — траектория движения конца электрода; 4 — вытекающий жидкий металл

Воздушно-дуговая резка состоит в том, что металл, расплавленный электрической дугой, непрерывно удаляется струей сжатого воздуха. Дуга горит между угольным электродом и поверхностью разрезаемого изделия, а сжатый воздух в зону реза подается из горелки.

Кислородно-дуговая резка основана на расплавлении металла электрической дугой и его сгорании в струе кислорода. Образующиеся при этом шлаки удаляются из зоны реза кислородной струей, а качество реза более высокое, чем при воздушно-дуговой резке. Резку можно производить как угольным электродом, так и металлическим. Для подводной кислородно-дуговой резки используют трубчатые металлические электроды, по внутреннему каналу которых подается режущий кислород (рис. 6.31).

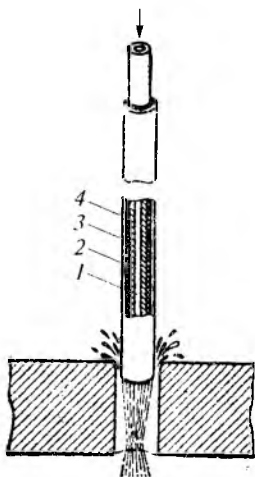


Рис. 6.31. Подводная кислородно-дуговая резка:

1 — канал для режущего кислорода; 2 — стальной трубчатый стержень; 3 — электродное покрытие; 4 — гидроизоляция

Плазменная резка широко применяется в последние годы для выполнения качественной резки сплавов алюминия, легированных и даже низкоуглеродистых сталей. Суть ее в том, что металл в зоне реза расплавляется и частично испаряется с помощью струи плазмы, получаемой в дуге. Этой же струей металл удаляется из зоны реза. Температура плазмы достигает $30\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$, а скорость ее истечения из сопла плазменной горелки — 2000 м/с . Плазменная резка может применяться для металла толщиной от долей до десятков миллиметров. Для резки тонких материалов (металлов, керамики) используют процесс с плазменной струей (рис. 3.36, б, в), а для резки толстых листов из алюминия, магния, меди, никеля, нержавеющей сталей и некоторых других материалов целесообразно применять процесс со сжатой дугой (рис. 3.36, а). Мощными плазменными горелками, работающими при напряжении до 200 В , можно разрезать плиты толщиной до 150 мм и более.

Важное преимущество плазменно-дуговой резки в том, что она значительно экономичнее кислородной резки при ее использовании для раскроя конструкционных сталей толщиной $35\text{--}40\text{ мм}$. Кроме того, при правильно выбранных режимах резки процесс плазменной резки характеризуется большей скоростью, меньшими деформациями, минимальным гратом, легко автоматизируем, пригоден для обработки не только углеродистых и нержавеющей сталей, но и алюминия, меди, титана, а также других металлов и сплавов.

Недостатки плазменно-дуговой резки — интенсивное выделение аэрозолей, повышенный шум, ограниченные возможности резки со скосом.

Лазерная резка основана на тепловом действии лазерного излучения, сфокусированного специальной оптической системой в пятно с высокой плотностью мощности. В зависимости от конструктивных особенностей излучателей возможны импульсно-периодический режим или непрерывный лазерной резки. Последний в настоящее время получил большое распространение для раскроя материалов.

Для повышения эффективности резки в зону обработки совместно с лазерным лучом подают струю газа, способствующую

шую удалению продуктов из зоны разрушения (инертные или нейтральные газы — аргон, азот), или инициирующую химическую реакцию в месте воздействия излучения на металл (кислород, воздух).

Для газолазерной резки конструкционных сталей толщиной до 3 мм применяют в основном твердотельные лазеры мощностью до 0,5 кВт, CO_2 -лазеры мощностью до 1–1,5 кВт для резки проката толщиной до 6 мм. В последние годы за рубежом применяют CO_2 -лазеры мощностью 3 кВт для газолазерной резки металла толщиной до 25 мм.

На рис. 6.32 показан технологический комплекс на базе лазера ЛГТ-2.01 М разработки Института сварки России для резки металлов толщиной 0,5–4 мм и диэлектриков толщиной 0,5–25 мм.

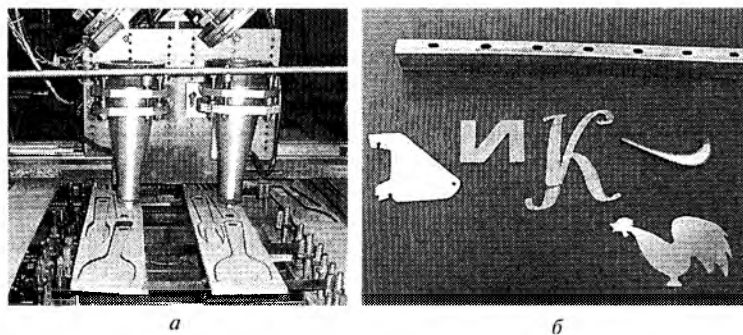


Рис. 6.32. Общий вид технологического комплекса на базе лазера ЛГТ-2.01 М (а) и образцы вырезанных деталей (б)

Основные преимущества лазерной резки — высокая точность, малая ширина реза, минимальные деформации, возможность вырезки сложных контуров, а также резки твердых и хрупких материалов.

К недостаткам способа газолазерной резки следует отнести большие капитальные затраты на приобретение и установку оборудования, необходимость в высококвалифицированном персонале для обслуживания лазерного комплекса, невозможность осуществления резки ручным инструментом, ограни-

ченные возможности резки проката средней толщины. Кроме того, лазерные установки могут быть рентабельными только при их загрузке на 90–95 %, что трудно обеспечить в условиях мелких и средних производств.

Электронно-лучевая резка осуществляется использованием аксиально-симметричных электронных пучков, однако требования, предъявляемые к геометрии электронного пучка, более жесткие, чем при сварке.

Электронный пучок для резки должен иметь четко очерченную границу (без «ореола») и меньший в 1,5–2 раза диаметр, чем для сварки. С этой целью в оборудовании предусматривают сменный комплект деталей электронно-оптической системы. В настоящее время разработаны технологии центробежной и линейной резки.

Центробежная резка применяется для резки цилиндрических деталей перпендикулярно их оси при высокоскоростном вращении (рис. 6.33). При этом развивается центробежная сила, выбрасывающая расплавляемый металл из зоны резки, и происходит послойное удаление металла.

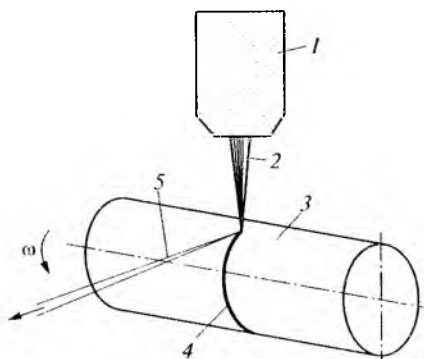


Рис. 6.33. Схема процесса центробежной резки тел вращения электронным пучком:

1 – электронная пушка; 2 – электронный пучок; 3 – разрезаемая деталь; 4 – рез; 5 – поток капель удаляемого расплава; ω – круговая частота вращения детали

Для мелкокапельного (радиус капли расплава 0,25 мм) удаления расплава из зоны резки стального вала диаметром 20 мм необходима частота его вращения 7500 об/мин. При этом ширина реза не превышает 2,5 мм, а неровности поверхности реза – менее 160–250 мкм.

При резке листового металла, а также изделий переменной толщины осуществляют линейное относительное перемещение электронной пушки и разрезаемого листа или изделия (рис. 6.34). В таком случае рез формируется за один проход. Эффективное удаление расплавляемого электронным пучком металла производят методом «принудительного» переноса, что позволяет достичь минимальной ширины реза и высокого качества поверхности реза. Слицевой и обратной сторон реза образуется небольшой грат.

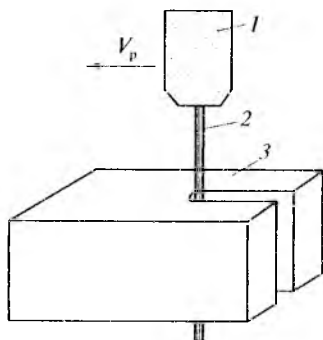


Рис. 6.34. Схема процесса линейной резки электронным пучком: 1 – электронная пушка; 2 – электронный пучок; 3 – разрезаемая деталь

Электронно-лучевая резка – экологически чистый процесс, так как ее проводят в закрытых вакуумных камерах. Она не требует расхода дорогостоящих газов, как другие способы термической резки. Этот процесс можно использовать как в основном производстве, так и в заготовительном.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем различаются механизмы образования соединения при сварке пластмасс и металлов?
2. Какие способы сварки пластмасс вы знаете?
3. Происходит ли оплавление соединяемых заготовок при пайке?
4. Чем отличаются процессы образования соединения при пайке и сварке плавлением (давлением)?
5. Перечислите известные вам способы пайки.
6. Какие задачи позволяет решать наплавка металла?
7. Какие источники теплоты используются при наплавке?

ченные возможности резки проката средней толщины. Кроме того, лазерные установки могут быть рентабельными только при их загрузке на 90–95 %, что трудно обеспечить в условиях мелких и средних производств.

Электронно-лучевая резка осуществляется использованием аксиально-симметричных электронных пучков, однако требования, предъявляемые к геометрии электронного пучка, более жесткие, чем при сварке.

Электронный пучок для резки должен иметь четко очерченную границу (без «ореола») и меньший в 1,5–2 раза диаметр, чем для сварки. С этой целью в оборудовании предусматривают сменный комплект деталей электронно-оптической системы. В настоящее время разработаны технологии центростремительной и линейной резки.

Центростремительная резка применяется для резки цилиндрических деталей перпендикулярно их оси при высокоскоростном вращении (рис. 6.33). При этом развивается центростремительная сила, выбрасывающая расплавляемый металл из зоны резки, и происходит послойное удаление металла.

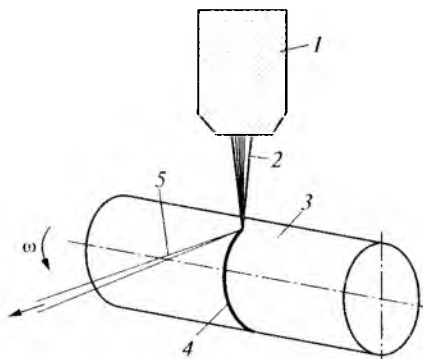


Рис. 6.33. Схема процесса центростремительной резки тел вращения электронным пучком:

1 – электронная пушка; 2 – электронный пучок; 3 – разрезаемая деталь; 4 – рез; 5 – поток капель удаляемого расплава; ω – круговая частота вращения детали

Для мелкокапельного (радиус капли расплава 0,25 мм) удаления расплава из зоны резки стального вала диаметром 20 мм необходима частота его вращения 7500 об/мин. При этом ширина реза не превышает 2,5 мм, а неровности поверхности реза – менее 160–250 мкм.

При резке листового металла, а также изделий переменной толщины осуществляют линейное относительное перемещение электронной пушки и разрезаемого листа или изделия (рис. 6.34). В таком случае рез формируется за один проход. Эффективное удаление расплавляемого электронным пучком металла производят методом «принудительного» переноса, что позволяет достичь минимальной ширины реза и высокого качества поверхности реза. Слицевой и обратной сторон реза образуется небольшой грат.

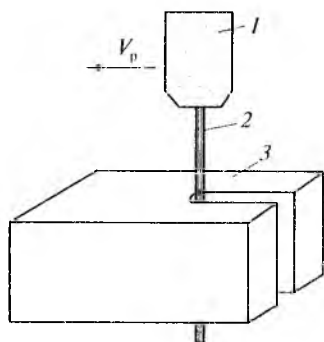


Рис. 6.34. Схема процесса линейной резки электронным пучком: 1 — электронная пушка; 2 — электронный пучок; 3 — разрезаемая деталь

Электронно-лучевая резка — экологически чистый процесс, так как ее проводят в закрытых вакуумных камерах. Она не требует расхода дорогостоящих газов, как другие способы термической резки. Этот процесс можно использовать как в основном производстве, так и в заготовительном.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем различаются механизмы образования соединения при сварке пластмасс и металлов?
2. Какие способы сварки пластмасс вы знаете?
3. Происходит ли оплавление соединяемых заготовок при пайке?
4. Чем отличаются процессы образования соединения при пайке и сварке плавлением (давлением)?
5. Перечислите известные вам способы пайки.
6. Какие задачи позволяет решать наплавка металла?
7. Какие источники теплоты используются при наплавке?

8. Какие способы термической резки металлов используются в промышленности?
9. Какой процесс лежит в основе газовой резки металлов?
10. Для каких конструкционных материалов возможно применение газовой резки?
11. Чем отличается газовая резка от плазменной и лазерной резки?

ГЛАВА 7 ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

7.1. Проектирование сварных конструкций

Прежде чем изготавливать сварные конструкции, необходимо выбрать материалы, из которых их следует изготовить, и произвести расчет прочности, надежности и технологичности сварных соединений. Высокие эксплуатационные характеристики сварных конструкций могут быть обеспечены при правильном выборе расчетных схем, рациональных конструкторских решениях и совершенствовании технологических процессов сборки и сварки.

При проектировании сварных конструкций их прочность определяется на основании расчетов, которые сводятся к определению напряжений, возникающих в элементах изделий от приложения нагрузки.

В металле сварных швов сварных соединений при нагружении могут возникать напряжения двух видов — рабочие и связующие, различающиеся направлением приложения нагрузки относительно расположения шва (рис. 7.1). Аналогичным образом различают рабочие и связующие швы.

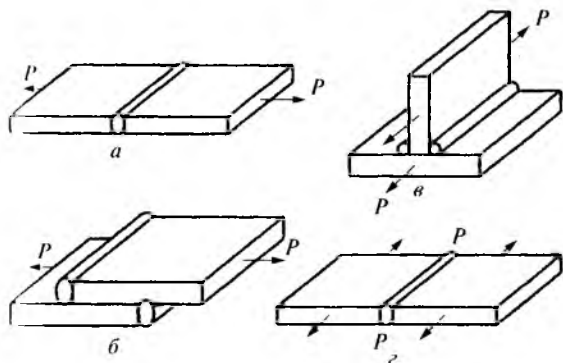


Рис. 7.1. Сварные соединения со швами:
а, б — рабочими;
в, г — связующими

Рабочими соединениями называют сварные соединения, разрушение которых влечет за собой выход из строя конструкции, *рабочими напряжениями* называют напряжения, действующие в этих конструкциях. Через рабочие швы передается вся нагрузка.

В конструкции со связующими швами наплавленный металл, соединяющий полосы, деформируется вместе с основным, при этом в нем возникают напряжения. Если модули упругости наплавленного и основного металлов различаются незначительно, то в швах при их работе в пределах упругих деформаций образуются напряжения той же амплитуды, что и в растягиваемых полосах. Таким образом, через связующие швы передается лишь часть нагрузки, пропорциональная части сечения связующего шва от общей площади поперечного сечения соединения. Расчет связующих швов на прочность не производится.

Существуют два основных метода расчета конструкций по допускаемым напряжениям и по предельным состояниям.

Метод по допускаемым напряжениям использует условие прочности в виде $\sigma \leq [\sigma]$, где $[\sigma] = \sigma_n/n$ — допускаемое напряжение, которое составляет некоторую часть предела текучести материала; n — коэффициент запаса прочности.

Из соединений — стыковых, нахлесточных, тавровых и угловых — наиболее оптимальными являются стыковые.

У *стыкового соединения* подготовка кромок определяется толщиной соединяемых элементов, технологическим процессом сварки и регламентирована соответствующими ГОСТами.

Если элемент конструкции со сварным швом работает на растяжение, то под действием приложенной нагрузки возникает напряжение

$$\sigma = P/F, \quad (7.1)$$

где P — усилие, приложенное нормально сварному шву; $F = Sl$ — площадь сечения шва; S — толщина основного металла (усиление шва не учитывается); l — длина шва.

При работе элементов из высокопрочных сталей наиболее слабым участком в сварном соединении оказывается зона сплавления металла шва и основного металла вследствие раз-

прочнения от воздействия термического цикла сварки. В данном случае расчет прочности швов следует заменить расчетом прочности соединения в ослабленных зонах с учетом особенностей механических свойств металла, его термообработки.

В нахлесточных соединениях швы называются угловыми. При этом в зависимости от расположения по отношению к направлению приложения нагрузки различают угловые швы лобовые, фланговые, косые, комбинированные.

Угловые швы имеют различные очертания (рис. 7.2) — нормальные, выпуклые, вогнутые. Выпуклые швы наименее целесообразны, так как способствуют высокой концентрации напряжений и перерасходу наплавленного металла. Наиболее целесообразны угловые швы, имеющие очертания неравнобедренного треугольника с отношением основания к высоте 1,5:1; 2:1. Наибольшее распространение в практике имеют швы нормального очертания с катетом k .

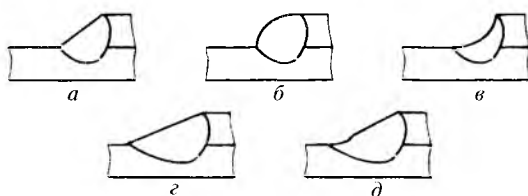


Рис. 7.2. Очертания угловых швов:

a — нормальное; $б$ — выпуклое; $в$ — вогнутое; $г$ — отношение катетов 2:1; $д$ — то же с обработкой конца шва

При расчете угловых швов используют понятие расчетной толщины шва, определяемой как произведение катета шва k на коэффициент β , учитывающий технологический процесс сварки.

Минимальный катет шва в машиностроении принимают равным 3 мм, за исключением конструкций, в которых толщина самого металла менее 3 мм. Верхний предел толщины швов не ограничен, но катеты свыше 20 мм встречаются крайне редко. Вследствие низкого качества шва в местах зажигания и обрыва дуги минимальная длина углового шва принимается равной 30 мм.

В *лобовом шве*, расположенном перпендикулярно приложенному усилию, возникает несколько составляющих напряжений (рис. 7.3): нормальные напряжения σ на вертикальной

плоскости шва в зоне сплавления и касательные напряжения τ на горизонтальной плоскости. По методу, принятому в инженерной практике, расчет прочности лобовых швов производится на срез. При статических нагрузках и треугольном очертании шва слабым сечением считают наименьшее сечение, совпадающее с биссектрисой прямого угла. По этой плоскости проверяют прочность лобового шва.

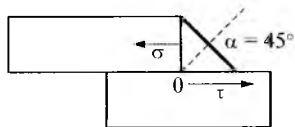


Рис. 7.3. Лобовые швы

Лобовые швы в соединении на рис. 7.4, а рассчитываются по формуле

$$\tau = \frac{P}{\beta k 2l} \leq [\tau^*], \quad (7.2)$$

где l — расчетная длина шва; $[\tau^*]$ — допускаемые касательные напряжения.

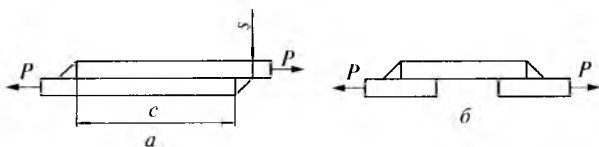


Рис. 7.4. Соединения с лобовыми швами

Так как каждый из двух швов передает половину приложенной нагрузки, то расчетная длина шва удваивается. Расстояние между лобовыми швами следует выбирать из условия

$$c \geq 4s, \quad (7.3)$$

где s — толщина металла.

В соединении на рис. 7.4, б каждый из швов передает всю нагрузку, поэтому расчет для таких швов выполняют по формуле

$$\tau = \frac{P}{\beta k l} \leq [\tau^*], \quad (7.4)$$

где $P = [\tau^*] \beta k l$.

Фланговые швы расположены параллельно усилию. В результате совместной деформации основного и наплавленного металла во фланговых швах образуются связующие напряжения (их не учитывают) и напряжения среза (в месте соприкосновения валика с листом и самом валике), которые являются рабочими напряжениями.

Предполагается, что напряжения вдоль флангового шва распределены равномерно.

С учетом концентрации напряжений расчетная длина фланговых швов должна быть не менее $50k$.

Косые швы направлены к усилию под некоторым углом.

Соединения с фланговыми и косыми швами рассчитываются также по (7.4).

Распределение усилий в отдельных швах, составляющих комбинированное соединение, неодинаково, однако расчет на прочность производится согласно принципу независимости действия сил

$$\tau = \frac{P}{\beta k L} \leq [\tau^*], \quad (7.5)$$

где L — суммарная длина комбинированного шва.

Тавровые соединения применяют для элементов, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 7.5). Эти соединения можно выполнять без подготовки кромок (рис. 7.5, а), с односторонней подготовкой кромок при толщине листов 4—26 мм (рис. 7.5, б), с двусторонней подготовкой кромок элементов толщиной 12—60 мм (рис. 7.5, в).

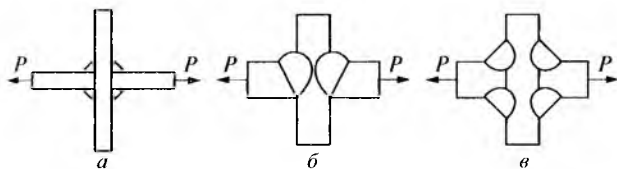


Рис. 7.5. Виды тавровых соединений

При работе соединения (рис. 7.5, а) на растяжение расчет на прочность можно провести по формуле (7.2).

Для соединений (рис. 7.5, б, в) допускаемые усилия вычисляются по формуле

$$P = [\sigma]sl. \quad (7.6)$$

При работе узла на сжатие нагрузка зачастую передается с горизонтального листа на вертикальный через плоскость соприкосновения листов. Проверка прочности швов в этом случае производится в предположении, что усилие передается через швы.

Угловые соединения в основном применяются в связующих элементах и не подлежат расчету на прочность.

Метод расчета по предельным состояниям является более точным; он учитывает условия работы и однородность материала конструкции. *Предельным* называется состояние, когда под действием нагрузки происходят качественные изменения свойств материала или наступает физический процесс, по каким-либо причинам недопустимый, нежелательный или опасный. Характерными случаями являются:

- ◇ наступление текучести в основном сечении элементов конструкции или разрушение под действием статических, повторно-переменных и динамических нагрузок;
- ◇ предельное состояние, обусловленное наибольшей деформацией конструкции, недопустимыми прогибами при статических нагрузках, колебаниями при динамических нагрузках;
- ◇ предельное состояние, характеризующееся максимально допустимыми местными повреждениями (деформациями, трещинами).

Возможно сочетание различных предельных состояний.

При расчете конструкции по предельному состоянию условие прочности записывается в виде

$$N/F < mR,$$

где N — расчетное усилие; F — площадь расчетного сечения; R — расчетное сопротивление материала; m — коэффициент условий работы, учитывающий степень ответственности конструкции, возможность дополнительных деформаций при эксплуатации, жесткость узлов. Расчетное сопротивление металла стыковых швов устанавливают по специальным нормативам. Так, по этим нормам для стыковых швов, выполненных ручной и механизированной сваркой на стали Ст3, расчетное сопротивление при растяжении равно $R^{св}_c = 180$ МПа, при срезе $R^{св}_c = 130$ МПа, для угловых швов $R^{св}_c = 150$ МПа.

Стыковые швы на прочность рассчитывают по формуле

$$N = R_{св}^c s l,$$

где N — расчетное усилие, действующее в соединении; $R_{св}^c$ — расчетное сопротивление сварного стыкового соединения; s — толщина металла в расчетном сечении; l — длина шва.

Расчетное усилие для угловых швов рассчитывают по формуле

$$N = 0,7 k l R_{св}^c,$$

где k — катет шва; l — длина шва; $R_{св}^c$ — расчетное сопротивление срезу, коэффициент 0,7 показывает, что расчет ведется в предположении разрушения шва в плоскости, проходящей по гипотенузе прямоугольного треугольника (рис. 7.6).

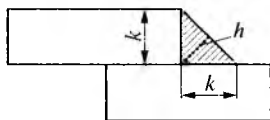


Рис. 7.6. Плоскость разрушения h в сечении углового сварного шва

7.2. Заготовительные работы в производстве сварных конструкций

Процесс изготовления сварных конструкций помимо сварки включает такие этапы, как получение заготовок, отвечающих требованиям сварки; подготовка заготовок под сварку; сборка; дополнительная обработка после сварки (термообработка, правка, механообработка); контроль, без которых сварка не может производиться и которые с ней тесно связаны, во многом определяя получение конструкции с заданными свойствами. Этот комплекс работ в целом рассматривается как *сварочное производство* и организуется с учетом особенностей той или иной отрасли промышленности. Такое комплексное рассмотрение сварочного производства необходимо при решении вопросов совершенствования и сварных конструкций, и методов их изготовления.

Около 70 % всех сварных конструкций из самого распространенного материала — сталей изготавливают с помощью электродуговой сварки, поэтому познакомимся со сварочным производством на примере этого вида сварки.

Характерными особенностями развития современного сварочного производства являются механизация и автоматизация производства, которые позволяют повысить производительность процесса, улучшить качество соединений и условия труда. Под механизацией производства понимается замена в нем ручного труда энергией машин и механизмов, при этом функции управления процессом остаются за человеком. Автоматизация — более высокая стадия механизации, при которой функции управления выполняются автоматическими устройствами. Автоматизация не только механизует труд, но и управляет им.

Заготовки для изготовления сварных конструкций могут быть из проката литые и кованные. Технологический процесс заготовки деталей из проката включает такие операции, как правка, разметка, резка, штамповка.

Правка производится в холодном состоянии за счет создания местной пластической деформации, например, на листах правильных вальцах (рис. 7.7, а). Правка достигается в результате изгиба и растяжения путем многократного пропускания листов между верхними и нижними рядами валков. На том же принципе основаны углоправильные вальцы для правки уголков (рис. 7.7, б). Правка двутавров и швеллеров осуществляется на правильногибочных прессах. Прокатный профиль 2 изгибается между опорами 1 и толкателем 3 (рис. 7.7, в).

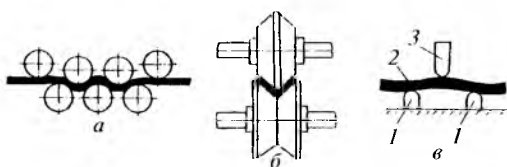


Рис. 7.7. Схема правки листового проката (а), уголков (б) и прокатного профиля (в)

Разметка бывает индивидуальная. Более производительной операцией является наметка по шаблонам. Однако изготовление специальных наметочных шаблонов целесообразно только для серийного производства или для повторяющихся конструкций единичного производства.

Резка при изготовлении деталей сварных конструкций при меняется следующих видов: на ножницах, на отрезных станках, термическая, в штампах на прессах.

Процесс резки на ножницах основан на упругопластической деформации и скалывании металла под давлением ножа. Разрезаемый лист 2 заводят между нижним 1 и верхним 4 ножами ножниц до упора 5 и зажимают под прижимом 3 (рис. 7.8). Под давлением верхнего ножа вначале происходит вдавливание ножей в металл, а затем его скалывание по поверхности между остриями режущих кромок.

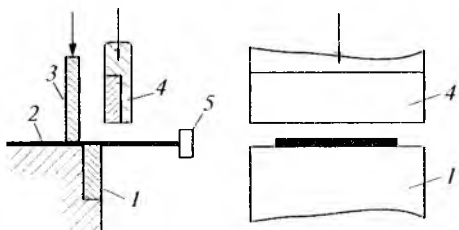


Рис. 7.8. Схема резки металла на ножницах

На *отрезных станках* можно резать материал большего сечения, чем на ножницах, и качество резки получается более высоким, однако при этом значительно увеличивается трудоемкость резки. Поэтому отрезные станки применяются для резки профилей, которые невозможно резать на ножницах, например для резки труб, профилей большого сечения, профилей под углом или в случаях, когда необходимо обеспечить высокую точность резки.

Разделительная термическая резка (кислородная и плазменно-дуговая) находит широкое применение в заготовительных работах. Ручная и полуавтоматическая резка производится обычно по разметке, автоматическая — с помощью копирных устройств или компьютерных программ.

Ручная резка имеет ограниченное применение для получения заготовок сварных конструкций, так как она более трудоемка и не обеспечивает требуемую точность реза. Машинная резка, один из наиболее прогрессивных технологических процессов, позволяет вырезать детали сложной формы (рис. 7.9) с высокой точностью, исключает трудоемкие операции разметки, обеспечивает высокую производительность.

Машины для термической резки делятся на универсальные, которые бывают стационарные и переносные и предназначены для вырезки разнообразных по размерам и конфигурации деталей из листового металла, и специальные для вы-

полнения какой-либо определенной операции, например для вырезки фланцев, резки труб и др.

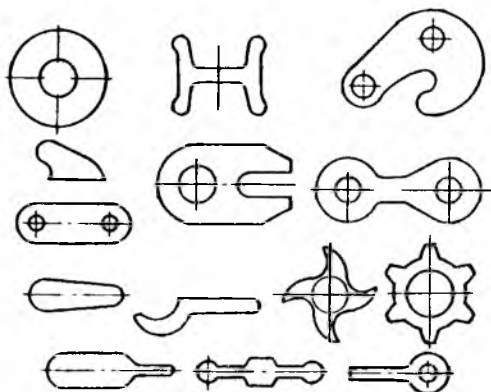


Рис. 7.9. Формы заготовок, получаемых термической резкой

На рис. 7.10 приведены схемы термической резки и общий вид универсальной машины термической резки серии «Кристалл-2,5», предназначенной для раскроя по программе листового проката черных и цветных металлов методом плазменной или кислородной газопламенной резки. Толщина разрезаемого металла от 1 до 20 мм. Ширина разрезаемого листа до 2,5 м, длина листа не регламентируется.

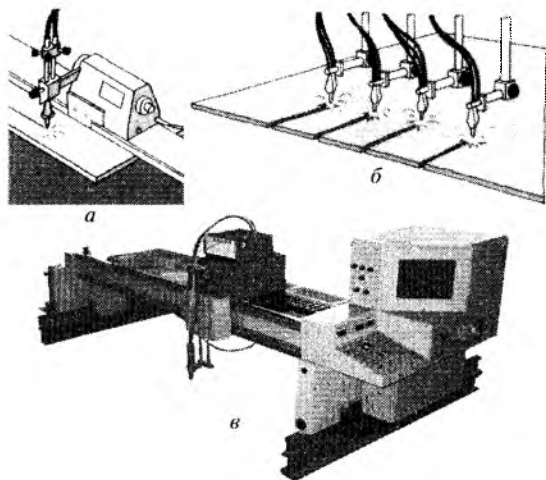


Рис. 7.10. Схемы одно- (а) и много- (б) сопловой термической резки и общий вид портальной машины термической резки серии «Кристалл-2,5» (в)

Резка сортового и фасонного проката может осуществляться с использованием пресс-ножниц комбинированных, ножниц комбинированных, сортовых, для резки уголка, для резки швеллеров и двутавров.

На пресс-ножницах комбинированных можно резать полосу, круг, квадрат, уголок, тавр, швеллер и двутавр, а также резать листовой материал и осуществлять операции пробивки отверстий в листах и фасонных заготовках.

При резке фасонного проката, так же как и при резке листового проката на ножницах, время резки составляет небольшую часть в общей трудоемкости. Поэтому комплексная механизация резки фасонного проката обеспечивает значительное сокращение трудоемкости и улучшение условий труда рабочих.

На комплексно-механизированных линиях в автоматическом режиме выполняются следующие операции: подача заготовки под отрезное устройство; отрезка конца заготовки; подача заготовки под штамп прессы; вырубка фигурных отверстий; подача заготовки под отрезное устройство; отрезка детали на заданную длину; подача детали под маркировочный автомат; маркировка детали; сортировка деталей по длине. В линию входят: система программного управления; пресс с подающим, вырубным и отрезным устройствами; насосная станция; клеймильный автомат и отводной рольганг. Для смены штампов применяют быстродействующий блок роторного типа.

Холодная листовая штамповка в производстве сварных конструкций является наиболее прогрессивным технологическим процессом, обеспечивая высокие точность и производительность, низкую себестоимость изготовления деталей, сокращение массы сварных конструкций, объема сборочно-сварочных работ и расхода металла. Основными видами холодной штамповки являются вырубка (пробивка), гибка, вытяжка (рис. 7.11).

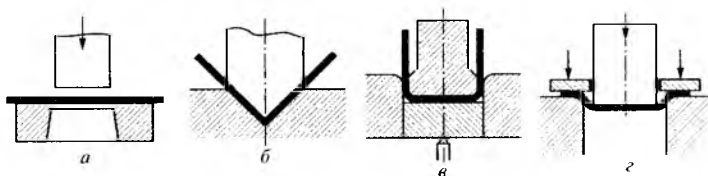


Рис. 7.11. Схемы холодной штамповки:

а — вырубка; *б* — одноугловая гибка; *в* — двухугловая гибка; *г* — вытяжка

7.3. Подготовка заготовок под сварку

Существующие способы дуговой сварки без специальной подготовки кромок (без разделки) позволяют сваривать металл ограниченной толщины: до 4 мм при односторонней ручной сварке, до 18 мм при механизированной под флюсом. Поэтому при сварке металла большой толщины кромки необходимо разделять, чтобы обеспечить доступ дуги в глубь соединения и полное проплавление кромок на всю толщину.

В зависимости от толщины свариваемого металла форма подготовки кромок может быть: с отбортовкой, без скоса, со скосом одной или двух кромок (табл. 7.1).

Т а б л и ц а 7.1. Подготовка кромок под сварку для стыковых соединений

Форма подготовленных кромок	Характер сварного шва	Форма поперечного сечения		Толщина свариваемых деталей, мм
		подготовленных кромок	сварного шва	
С отбортовкой	Односторонний			1–4
Без скоса	Двусторонний			1–6
Без скоса	Односторонний			3–8
С V-образным скосом	Двусторонний			3–60
С X-образным скосом				8–120
С К-образным скосом				8–100
С криволинейным скосом				15–100

Форму *разделки кромок* и их сборку под сварку характеризуют четыре основных конструктивных элемента (рис. 7.12): за-

зор b , необходимый для провара вершины шва, притупление c , обеспечивающее правильное формирование и предотвращающее прожоги в вершине шва, угол скоса β и угол разделки α .

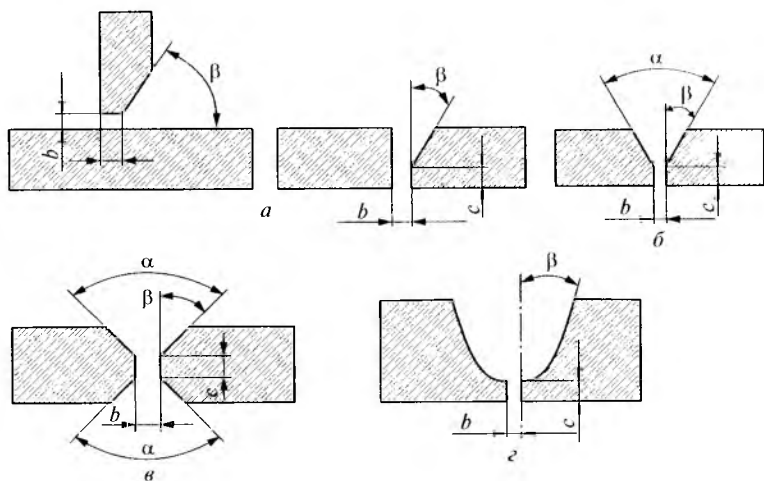


Рис. 7.12. Конструктивные элементы разделки кромок:

a — разделка одной кромки; $б, в, з$ — разделка двух кромок; $б$ — V-образная; $в$ — X-образная; $з$ — U-образная

Угол разделки кромок в зависимости от способа сварки и типа соединения изменяется в довольно широких пределах — от 60 до 90°. Тип разделки и угол разделки кромок определяют количество необходимого дополнительного металла для заполнения разделки, а значит, и производительность сварки.

Так, X-образная разделка кромок по сравнению с V-образной позволяет уменьшить объем наплавленного металла в 1,6–1,7 раза, а также время на обработку кромок. Но в этом случае возникает необходимость вести сварку с одной стороны шва в неудобном потолочном положении или кантовать свариваемые изделия.

Отбортовку и гибку кромок под сварку выполняют на зигмашинах. Эти операции осуществляются между двумя вращающимися роликами соответствующего профиля (рис. 7.13). Верхний ролик имеет регулировку по высоте, благодаря которой происходит начальное деформирование заготовки.

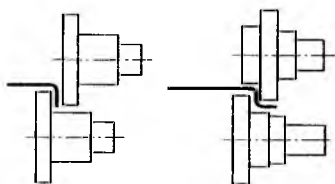


Рис. 7.13. Схема гибки на зиг-машинах

Для подготовки кромок используют механизированную термическую резку, резку на гильотинных ножницах и механическую обработку на токарных, карусельных, кромкострогательных станках и переносных агрегатах для снятия фаски (рис. 7.14), которые обеспечивают скорость обработки до 1,5 м/мин при ширине фаски S до 21 мм и глубине фаски H до 15 мм.

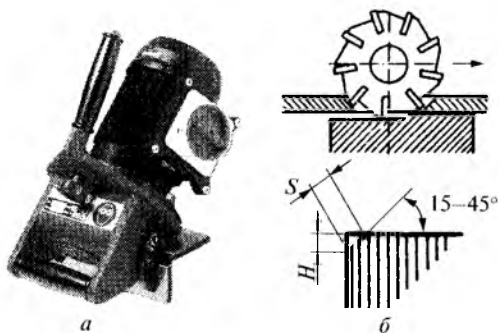


Рис. 7.14. Агрегат (а) и схема процесса снятия фаски (б)

Ручная кислородная резка иногда требует дополнительной зачистки кромок пневматическим зубилом или абразивным инструментом для удаления неровностей и наплывов шлака.

Перед сборкой подготовленные кромки должны быть очищены от ржавчины, масла, краски, влаги и других загрязнений, наличие которых может привести в процессе сварки к образованию пор, шлаковых включений и других дефектов. Очистке подвергаются торцовые кромки свариваемых деталей, а также прилегающие к ним участки металла шириной 25–30 мм. Очистка может производиться как механическими способами — вращающимися щетками из стальной проволоки (рис. 7.15), абразивным инструментом и т.д., так и газопламенной обработкой с использованием обычных сварочных или специальных мно-

гопламенных горелок для газовой сварки. Такой процесс очистки основан на быстром нагреве поверхности детали, при котором окалина отслаивается, ржавчина обезживается, краска и масло сгорают, а влага испаряется. Остатки продуктов сгорания удаляют металлической щеткой. Детали после сборки не очищают, так как при очистке в зазор могут попасть загрязнения, которые вызовут пористость шва. Собранные конструкции перед сваркой можно только обдуть сжатым воздухом или прожигать газовой горелкой.

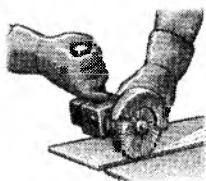


Рис. 7.15. Механическая зачистка кромок под сварку вращающейся щеткой

7.4. Сборочные работы

Процесс сборки сварного изделия состоит из ряда последовательных операций: 1) подача к месту сборки заготовок, из которых собирается изделие или сварной узел; 2) установка заготовок в сборочном устройстве в определенном положении; 3) закрепление деталей в этом положении; 4) сварка.

Глубокий провар, большой объем сварочной ванны, жидкотекучесть расплавленного металла и постоянная скорость сварки обуславливают необходимость выдерживать при сборке одинаковые зазоры, углы разделки и притупления кромок, так как в противном случае возможно образование непроваров или прожогов. Сборку заготовок под автоматическую сварку выполняют более тщательно, чем под ручную, особое внимание уделяя равномерности зазора по всей протяженности шва, так как в местах с увеличенным зазором швы получаются вогнутыми, а в местах с уменьшенным зазором получается большая выпуклость шва кроме уменьшения проплавления.

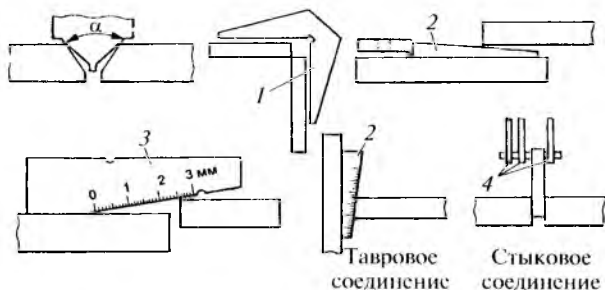


Рис. 7.16. Контроль точности сборки свариваемых заготовок:
1 — шаблон; 2 — щуп-шаблон; 3 — щуп с делениями; 4 — набор щупов

Точность сборки проверяют шаблонами, измерительными линейками и различного рода щупами (рис. 7.16).

Детали закрепляют зажимными элементами сборочных приспособлений, а при необходимости прихватывают (рис. 7.17). Прихватки ставят с лицевой стороны соединения.

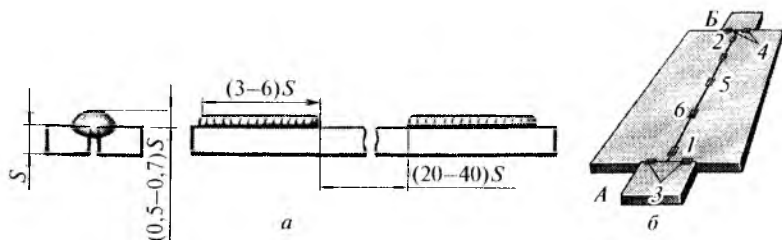


Рис. 7.17. Размеры прихваток (а) и общий вид заготовок в сборе (б):
А, Б — выводные планки для начала и окончания сварки; 1–6 — очередность выполнения прихваток

Приспособления и оснастка для сборки могут быть универсальными, предназначенными для большого числа разнообразных изделий, и специальными, применяемыми для одного изделия или нескольких однотипных.

Сборочные приспособления и оборудование можно разделить на следующие основные группы:

- ♦ сборочные кондукторы (рис. 7.18, а) — устройства, состоящие из плоской или пространственной рамы или плиты, на которой размещаются установочные и зажимные элементы, обеспечивающие необходимое расположение собираемых заготовок. В кондукторах обычно производится и сварка собранных изде-

лий, поэтому основание кондуктора должно быть жестким и прочным для восприятия усилий, возникающих в изделиях при сварке;

- ♦ сборочные стенды и установки (рис. 7.18, б), предназначенные для сборки крупных изделий и имеющие, как правило, неподвижное основание, на котором размещены установочные и зажимные элементы;
- ♦ сборно-разборные приспособления (рис. 7.18, в, д), составленные из отдельных взаимозаменяемых стандартных элементов, предназначенных для сборки изделий широкой номенклатуры. Приспособление состоит из плиты с Т-образными пазами, а также установочными и зажимными элементами, с помощью которых обеспечивается жесткое закрепление деталей;
- ♦ переносные сборочные приспособления – стяжки, струбцины, распорки и т.д. (рис. 7.18, г), применяемые в единичном производстве, на монтаже и в строительстве.

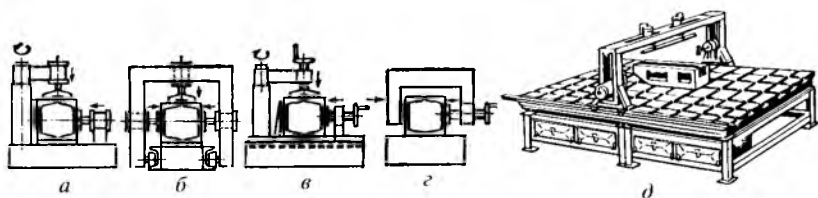


Рис. 7.18. Схемы (а–г) и общий вид (д) сборочных приспособлений

7.5. Сварочные работы

К сварочным работам относятся собственно сварочные операции и некоторые неразрывно связанные со сваркой вспомогательные операции: установка изделий под сварку или сварочной головки на начало шва; поворот изделий в процессе сварки, обеспечивающий необходимое для сварки положение свариваемого изделия и сварочного инструмента; вращение изделий в процессе сварки; отвод сварочного автомата или перемещение изделия; перемещения сварщика и т.д.

Поэтому комплексную механизацию и автоматизацию сварочных работ в общем случае можно рассматривать как сово-

купность решения двух задач: автоматизации собственно процесса сварки; механизации и автоматизации вспомогательных операций.

Автоматизация дуговой сварки. В общем объеме работ по производству сварных конструкций собственно сварочный процесс составляет всего 15–20 %, однако эта технологическая операция производства определяет конечные свойства и эксплуатационную надежность сварных соединений и конструкций в целом. В связи с этим автоматизация сварочного процесса, обеспечивающая повышение точности управления его технологическими параметрами и исключая влияние на него субъективных факторов (мастерство работающего, его утомляемость и т.п.), является необходимым условием повышения качества сварных соединений и его стабильности.

Процесс сварки характеризуется относительно большим числом факторов, влияющих на его развитие, и высокими скоростями их изменений. Для эффективного управления процессом сварки требуется обработка информации с такой большой скоростью, что в большинстве случаев недоступно для человека с его возможностями. Первые автоматические регуляторы дуги были предложены Н.Н. Бенардосом и Н.Г. Славяновым, который указывал, что если электрод плавкий, то невозможно поддерживать непрерывную вольтовую дугу без автоматического регулирования. Он считал, что только наличие регуляторов дуги может обеспечить реальную возможность промышленного применения дуговой сварки плавящимся электродом.

Автоматизация процесса сварки предполагает частичный или полный перевод сварочного оборудования на автоматический режим работы, при котором обеспечиваются: требуемый технологический цикл сварки (сварочный ток, напряжение на дуге, скорость сварки и скорость подачи электродной или присадочной проволоки и т.д.) и ориентированное движение рабочего органа — дуги по заданной траектории.

В современном сварочном оборудовании для дуговой сварки используются автоматические системы регулирования (стабилизации) параметров дуги и геометрических размеров сварочной ванны, системы программного управления, системы ориентации электрода по стыку.

Рассмотрим *системы автоматического регулирования параметров дуги при сварке плавящимся электродом.*

Сварочная головка, осуществляющая непрерывную подачу электродной проволоки в зону сварки и автоматическое регулирование параметров дуги, является основным рабочим органом в комплекте оборудования для автоматической сварки плавящимся электродом. В промышленности получили распространение сварочные головки двух типов, различающиеся способом регулирования и стабилизации дуги:

- 1) с постоянной, независимой скоростью подачи электродной проволоки;
- 2) с автоматическим регулированием напряжения (тока) дуги, осуществляемым путем воздействия на скорость подачи электрода.

В сварочных головках первого типа используется эффект саморегулирования дуги, который реализуется при достаточно высоких плотностях тока (100 А/мм^2 и более). В отечественном оборудовании этот эффект используется в сварочном тракторе ТС-17 и его модификациях, в автоматах АДФ-500, А-384, А-616 М, АБС и др., в полуавтоматах А537 Р, ПДГ-500-1, ПШП-16 и т.д.

Простейшая схема системы стабилизации дуги саморегулирования (рис. 7.19) состоит из механизма подачи электродной проволоки *МП*, дуги *Д* и источника питания *ИП*. Процесс саморегулирования дуги заключается в следующем. Любое отклонение длины дуги вызывает изменение напряжения на дуге U_d , которое при положопадающей характеристике источника питания приводит к значительному отклонению тока дуги. Это вызывает пропорциональное изменение скорости плавления электрода, в результате чего при постоянной скорости подачи электрода длина дуги достигает заданного значения, т.е. при случайном уменьшении длины дуги скорость плавления проволоки возрастает и становится больше скорости подачи, вследствие чего дуговой промежуток увеличивается до тех пор, пока не достигнет заданного значения. Когда длина дуги станет выше заданной, скорость плавления будет понижаться и соответственно будет уменьшаться дуговой промежуток до восстановления его нормальной длины.

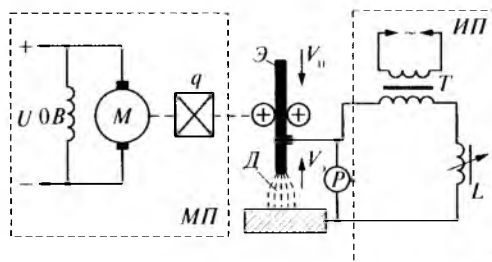


Рис. 7.19. Принципиальная схема автоматического регулирования дуги саморегулированием

Настройка сварочных головок на заданную скорость подачи электродной проволоки производится плавно или ступенчато путем уменьшения числа оборотов подающих роликов. В первом случае это осуществляется регулированием числа оборотов двигателя M механизма подачи, а во втором — сменными шестернями редуктора q или коробкой скоростей (рис. 7.19).

Наиболее простыми и надежными в эксплуатации являются те головки, в которых скорость подачи настраивается сменными шестернями. Они используются для крупносерийного и массового производства изделий с одностипными швами, когда не требуется частое изменение режимов сварки. Система бесступенчатого плавного регулирования позволяет легко и быстро изменять режим сварки на ходу и поэтому целесообразна при единичном и мелкосерийном характере производства.

Сварочные головки второго типа подают электродную проволоку со скоростью, зависящей от напряжения дуги. С увеличением длины дуги повышается ее напряжение, в связи с чем двигатель, подающий проволоку, увеличивает число оборотов и восстанавливает заданную длину дуги и соответственно ее напряжение. При случайном укорочении дуги напряжение падает, вращение двигателя и подача проволоки замедляются, в результате чего восстанавливаются нормальная длина дуги и ее напряжение.

Известно довольно много вариантов системы автоматического регулирования напряжения дуги с воздействием на скорость подачи проволоки, различающиеся способом сравнения напряжения на дуге с заданным (требуемым) напряжением, устройством усилителя и исполнительного органа. Наибольшее распространение получил автомат АДС-1000-2, принципиальная схема которого приведена на рис. 7.20.

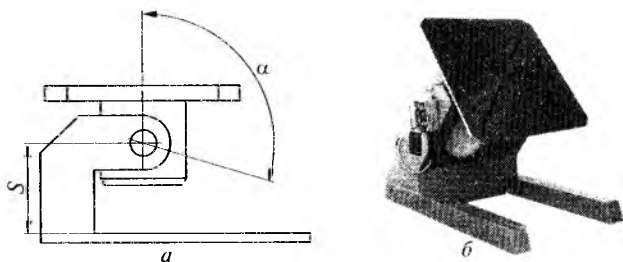


Рис. 7.21. Схема (а) и общий вид (б) универсального сварочного вращателя

Горизонтальные сварочные вращатели выполняют те же функции, что и универсальные, но только при расположении оси вращения в горизонтальной плоскости (рис. 7.22).

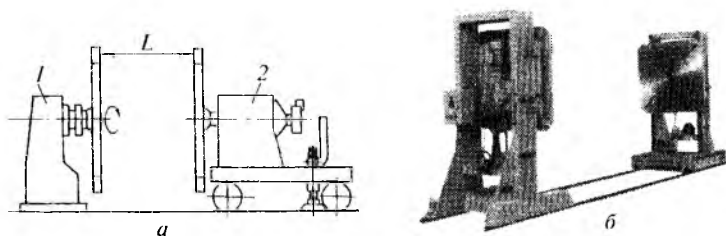


Рис. 7.22. Схема (а) и общий вид (б) горизонтального сварочного вращателя двухстоечного:

1 — передняя приводная стойка; 2 — задняя поддерживающая стойка

Роликовые сварочные вращатели предназначены для вращения цилиндрических изделий со сварочной скоростью при механизированной и автоматизированной сварке кольцевых швов, а также для установления изделий на маршевой скорости в удобное для сварки положение (рис. 7.23).

Секции вращателей изготовляют: стационарные и передвижные, приводные и не приводные (холостые), с одинарными и балансирными (самоустанавливающимися) роликами.

Сварочные кантователи предназначены для поворота свариваемого изделия вокруг горизонтальной оси в удобное для сварки положение. Их применяют также в отделочных операциях, которые требуют периодического поворота изделия на неопределенный угол в благоприятное для обработки положение, — при сборочных операциях, при зачистке сварных швов и др. Некоторые схемы кантователей приведены на рис. 7.24.

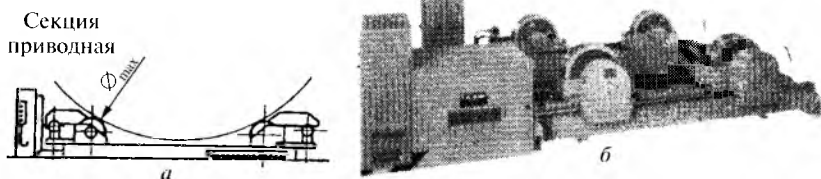


Рис. 7.23. Схема (а) и общий вид (б) роликового сварочного вращателя

Кантователи бывают:

- центровые, поворачивающие изделие вокруг оси, которая проходит через изделие (рис. 7.24, а);
- рычажные, поворачивающие изделие вокруг оси, которая проходит вне изделия (рис. 7.24, б);
- цепные, поворачивающие изделие вокруг оси, проходящей через изделие, с помощью гибкой тяги, на которую кладут изделие (рис. 7.24, в);
- кольцевые, поворачивающие изделие вокруг оси с помощью разъемного кольца, охватывающего изделие (рис. 7.24, г).

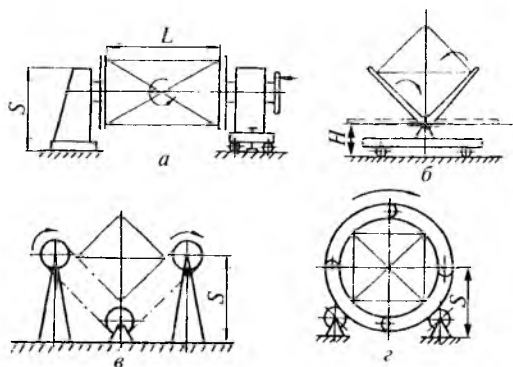


Рис. 7.24. Схемы типов кантователей:

а — центровой двухстоечный; б — рычажный перемещающийся (челночный); в — цепной; г — кольцевой

Колонны для сварочных автоматов бывают двух типов — для установки и перемещения самоходных и подвесных (несамоходных) сварочных автоматов (рис. 7.25). Первые используются для сварки кольцевых и прямолинейных продольных швов, а вторые — только для кольцевых швов.

Большинство колонн являются поворотными, что дает возможность отводить сварочный аппарат в сторону и устанавливать свободно изделие каким-либо подъемным устройством;

колонны бывают также передвижные (по рельсовому пути) и стационарные.

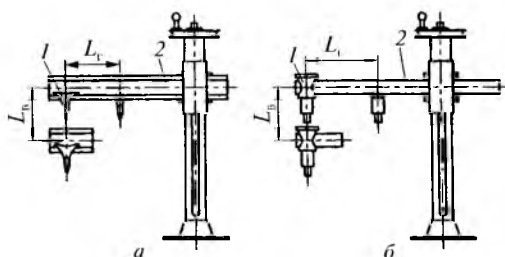


Рис. 7.25. Сварочные колонны для самоходного (а) и подвесного (б) сварочных автоматов:

1 — сварочный автомат; 2 — консоль; L_g — горизонтальный ход консоли или сварочного автомата вдоль оси колонны; L_v — вертикальный ход колонны

Колонны могут снабжаться фильтровентиляционными агрегатами для отсоса вредных веществ из зоны сварки и использоваться при работе с универсальными, вертикальными, горизонтальными и роликовыми вращателями (рис. 7.26).

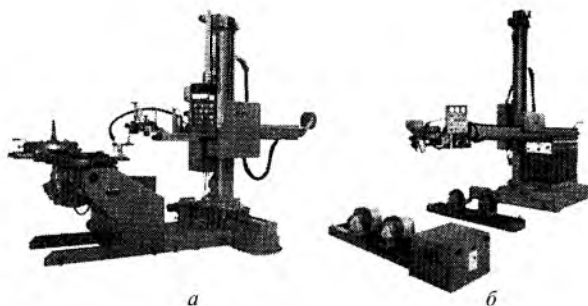


Рис. 7.26. Общий вид колонны с вращателем:

а — универсальным; б — роликовым

К оборудованию для перемещения сварщика относительно изделия относятся различного рода подъемные и подъемно-выдвижные площадки (балконы) с механизированным приводом дистанционного управления (рис. 7.27). При электрошлаковой сварке барабанов, котлов и других крупногабаритных изделий требуется перемещение сварщиков по вертикали на несколько метров. В этих случаях в процессе сварки применяют специальные лифты.

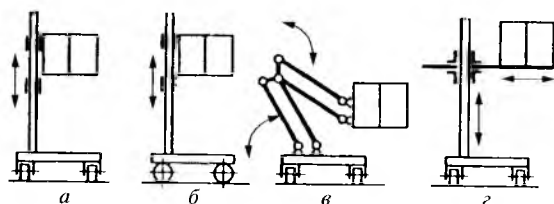


Рис. 7.27. Передвижные площадки для сварщика:

а — с передвижением вдоль фронта работ; *б* — с передвижением поперек фронта работ; *в* — шарнирно-рычажная; *г* — координатная

На рис. 7.28 приведена схема установки для дуговой сварки под флюсом, собранная из унифицированного механизированного оборудования. Эта установка с рабочим балконом предназначена для сварки резервуаров внешними продольными и кольцевыми швами. Возможность комбинации этой установки с четырьмя роликовыми вращателями обеспечивает ее высокую загрузку. При дуговой сварке под флюсом кольцевыми швами на балконе можно установить сварочную головку и перемещать ее на расстояние 2,5 м с целью точного позиционирования.

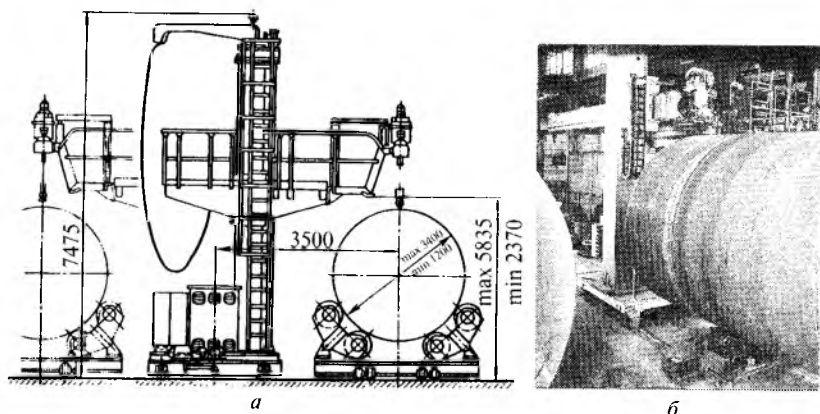


Рис. 7.28. Схема (а) и общий вид (б) универсальной установки для дуговой сварки

Существенное повышение производительности достигается при оснащении установки двумя сварочными головками и системой автоматического слежения за стыком. Установку с видеосистемой наблюдения за процессом сварки обслуживает один оператор.

Поточные механизированные и автоматизированные линии – комплекс оборудования, расположенного в порядке последовательности выполнения технологического процесса и обеспечивающего механизированное выполнение операций по изготовлению сварного изделия.

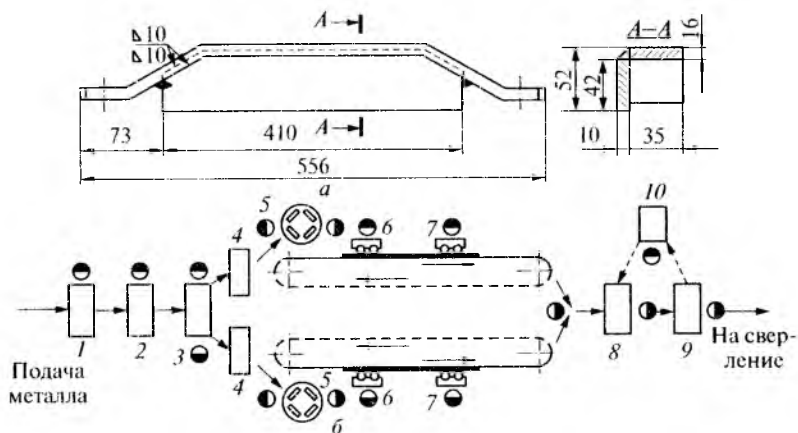


Рис. 7.29. Поточная механизированная линия изготовления скребков шахтных транспортеров:

a – скребок транспортера; *б* – схема планировки линии

В схеме поточной механизированной линии изготовления скребков шахтных транспортеров на рис. 7.29 полосовой металл подается со склада на поточную линию к прессу 1, на котором полосы режут на заготовки необходимых размеров. На прессе 2 производится гибка полос, после чего их передают на правильную плиту 3 и после правки складывают в ящики 4. Выправленные детали собирают в приспособлениях с клиновыми зажимами на двух поворотных столах 5 (на каждом столе по четыре таких приспособления). За каждым поворотным столом работают двое рабочих: один собирает скребок и освобождает его после прихватки, а второй производит прихватку собранных деталей. Собранный скребок устанавливают в поворотное приспособление для автоматической сварки под флюсом. На линии имеются два сварочных конвейера. Рабочий-сварщик вручную продвигает тележку к первой сварочной головке 6, где накладывается наружный сварной шов. После этого автосвар

щик поворачивает приспособление на 180° , сыпает флюс и передвигает тележку ко второй сварочной головке 7, на которой другой рабочий выполняет внутренний сварной шов, вынимает скребок из приспособления и передает его на плиту 8, где производится зачистка от шлака. Освободившаяся тележка по наклонному пути под действием собственного веса перекатывается к началу конвейера. Для проверки качества сварки предусмотрен контрольный пункт 9. Дефекты сварных швов устраняют на рабочем месте 10.

Автоматической сборочно-сварочной линией называется комплекс технологического и подъемно-транспортного оборудования, выполняющего без непосредственного участия человека в заданной технологической последовательности и с определенным ритмом операции подготовки, сборки и сварки.

Сварочные роботы. Согласно ГОСТ 25686–83, *промышленный робот* — автоматическая машина, представляющая собой манипулятор с перепрограммируемым устройством управления, для выполнения в производственном процессе двигательных и управляющих функций, заменяющих аналогичные функции человека при перемещении предметов производства и (или) технологической оснастки.

Термин «робот» ввел чешский писатель Карел Чапек в 1920 г. в своей фантастической пьесе «РУР» («Россумские универсальные роботы»). Этим словом были названы механические рабочие, предназначенные для замены людей на тяжелых физических работах. Далее многочисленное семейство роботов получило развитие на страницах научно-фантастических романов. Но не прошло и 40 лет, как робот вышел из стен научных лабораторий и начал применяться на производстве.

Промышленный робот для сварки может быть определен как манипуляционная система, оснащенная техническими средствами ведения сварочного процесса, с программным управлением координатами сварочного инструмента и изделия, а также параметрами режима сварки. У робота подвижная рука и шарнирная кисть с захватом, которые обладают свободой пространственных перемещений, в какой-то степени имитируя руку человека. В захвате кисти закрепляется сварочная головка (сварочные клещи при контактной сварке). Большинство сва-

ручных роботов имеет пять движений (степеней свободы) — три движения руки и два движения кисти (рис. 7.30).

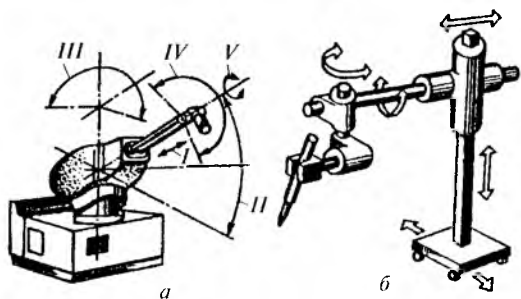


Рис. 7.30. Схемы роботов с перемещением руки в сферической (а) и прямоугольной системе координат (б)

При использовании сварочных роботов оператор становится в известной степени руководителем специализированного сварочного поста, который должен вести:

- ♦ выполнение несложных заданий по программированию;
- ♦ управление и контроль всех процессов в пределах роботизированного сварочного поста;
- ♦ контроль качества деталей, сваренных роботом;
- ♦ устранение неполадок при незапланированных остановках робота;
- ♦ выполнение дополнительных сварочных работ, недоступных для робота;
- ♦ заполнение магазинов для заготовок и присадочных материалов;
- ♦ очистку и замену изношенных деталей, например сопел горелок;
- ♦ работа в контакте с механиками по обслуживанию и ремонту, а также с мастерами и технологами.

В состав робототехнологического комплекса могут входить, например: сварочный робот (рис. 7.31) со шкафом, пультом управления и программирующим устройством; оборудование для установки и перемещения заготовок; сварочное оборудование; технологическая оснастка робота (устройство очистки и смазки горелки, ее защиты от поломки и др.).

В промышленно развитых странах серьезными стимулами роста инвестиций в производство и применение промышленных роботов являются:

- ♦ непрерывное снижение стоимости промышленных роботов на фоне роста стоимости рабочей силы; так, с 1990 по 1999 г. сред

няя цена промышленных роботов на рынке США снизилась на 40 %, а стоимость рабочей силы повысилась на 38–39 %;

- ◇ недостаток квалифицированной рабочей силы;
- ◇ освобождение работающих на производстве от тяжелого, интенсивного и монотонного труда;
- ◇ возможность улучшения экологической обстановки на производстве.

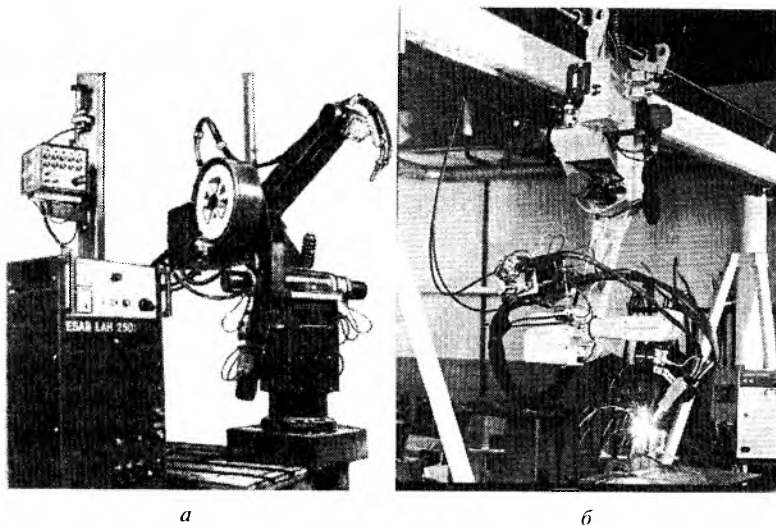


Рис. 7.31. Робот компании «Esab» с навесным механизмом подачи проволоки, предназначенный для сварки тонких деталей (а), и роботизированная сварочная система серии ARC MATE (б)

Применение роботов для автоматизации процессов дуговой сварки целесообразно при одновременном выполнении следующих условий:

изделие выпускают мелкими и средними партиями, а его конструкция по мере выпуска претерпевает некоторые изменения; швы сварных соединений конструкции либо сложной формы, либо короткие и различным образом ориентированные в пространстве;

к стабильности качества швов сварных соединений предъявляют повышенные требования (от изделия к изделию) при минимальном влиянии на качество «человеческого фактора»;

- ◇ стоимость разработки, изготовления и обслуживания специального сварочного автомата выше, чем серийно выпускаемого промышленного робота;
- ◇ высокая культура заготовительного и сварочного производства;
- ◇ наличие на предприятии технических служб по наладке и ремонту робототехнологических комплексов;
- ◇ на предприятии созданы благоприятные (как в моральном, так и в материальном плане) условия для обслуживающего робот персонала, стимулирующие бесперебойность работы комплекса.

7.6. Дополнительная обработка сваренных узлов

В процессе изготовления сварных конструкций в них возникают сварочные напряжения и деформации (гл. 2). Поэтому для устранения деформаций после сварки и снижения остаточных напряжений конструкции подвергают дополнительной правке, прокатке, термической и вибрационной обработке и в ряде случаев производят зачистку сварных швов.

Устранение деформаций после сварки. Широко используемая для устранения деформаций *термическая правка* осуществляется местным нагревом путем концентрированного и быстрого нагрева небольших участков конструкции с целью создания в них пластических деформаций сжатия. Быстро нагретый участок, вокруг которого металл остается сравнительно холодным, стремится расшириться во все стороны и из-за сопротивления расширению окружающего его холодного металла получает пластические деформации укорочения. В результате площадь прогретого участка после охлаждения уменьшается. Термическую правку используют в основном для устранения деформаций коробления листовых конструкций и ликвидации изгиба балочных конструкций.

На рис. 7.32 изображена искривленная балка таврового сечения и темными пятнами показаны возможные формы и расположение прогретых участков для выправления балки.

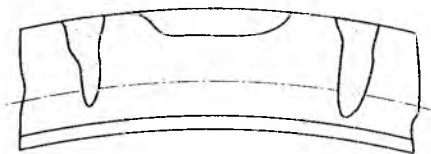


Рис. 7.32. Места прогрева сварной балки для ее выправления

Для *механической правки* в холодном состоянии крупногабаритных сварных узлов применяют гидравлические правильные прессы и специализированные правильные машины. Так, грибовидность сварных двутавровых балок — деформацию полок, образовавшуюся вследствие усадки сварных швов, выправляют на специализированной машине по схеме на рис. 7.33, а. Ролики 1 и 3 служат для подачи балки в процессе правки, нажимной ролик 2 движется возвратно-поступательно от электродвигателя через червячный редуктор и зубчатую передачу.

Правку сварных цилиндрических оболочек производят на трех- и четырехвалковых листогибочных машинах (рис. 7.33, б).

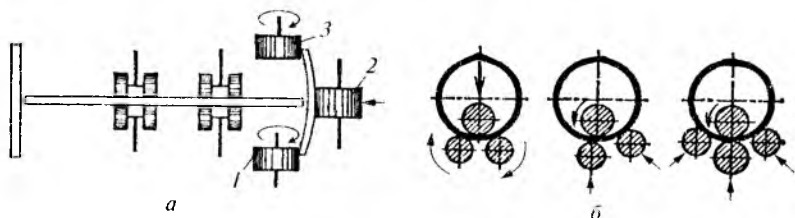


Рис. 7.33. Схемы механической правки сварных двутавровых балок (а) и цилиндрических оболочек (б)

Термомеханическая правка сочетает местный нагрев с приложением статической нагрузки, которая создается домкратами, прессами и другими устройствами и изгибает исправляемый элемент в нужном направлении. Применение дополнительного нагрева способствует снижению усилий, необходимых для устранения деформаций. Такой способ правки обычно применяют для жестких сварных узлов.

С целью улучшения свойств сварных соединений тонкостенных сосудов для исправления сварочных деформаций и пластического деформирования усиления сварных швов применяют специализированные станки для прокатки и проковки швов. Прокатка осуществляется роликами, а проковка — высо-

коскоростным ударным пневматическим устройством. При прокатке и проковке металл осаживается по толщине, в результате происходит его раздача в продольном и поперечном направлениях. Это приводит к небольшому устранению поперечной усадки и существенному или полному устранению продольных деформаций укорочения зоны сварки.

Если изделие сварено из высокопрочного материала, избавиться от деформаций очень трудно. Единственным эффективным способом борьбы с такими деформациями может стать термофиксация — отжиг конструкции в зажимном приспособлении. Приспособление изготавливается очень жестким, а сварная конструкция зажимается так, чтобы за счет упругого деформирования остаточная деформация ликвидировалась или появилась деформация обратного знака, например обратный выгиб. В результате, когда конструкция вместе с зажимным приспособлением, обладающим более высокой жесткостью, чем конструкция, нагревается в печи, упругая деформация переходит в пластическую и после отпуска проектная форма восстанавливается. Попытки исправить конструкции из высокопрочных материалов вручную или под прессом часто приводят к ее разрушению.

Снижение остаточных напряжений. В промышленности наиболее распространен способ снижения остаточных напряжений в процессе *отпуска (отжига)* сварных конструкций без зажимных приспособлений, который также способствует выравниванию структуры металла в различных зонах сварного соединения и восстановлению пластических свойств. Отпуск целесообразен, когда изготовление сварной конструкции предусматривает последующую обработку резанием, повышенные требования к точности, стабильности формы и геометрических размеров при эксплуатационных нагрузках, а также в тех случаях, когда необходимо повысить сопротивление хрупким разрушениям при низких температурах. Бывают случаи, когда отпуск нецелесообразен, например для конструкций, изготовленных из разнородных материалов, когда в результате отпуска не происходит снижения остаточных напряжений, а также в тех случаях, когда жесткость различных частей конструкции сильно отличается.

Различают отпуск высокий, средний и низкий. Для низкоуглеродистых и низколегированных сталей этому соответствуют три диапазона температур: 550–680, 350–500 и 250–300 °С.

Кривая изменения температуры в процессе отпуска изображена на рис. 7.34. В начальный момент температура быстро повышается, затем следует стадия выдержки и последний этап — охлаждение. Штриховой участок на температурной кривой соответствует стадии выравнивания температуры по толщине металла. На температурный график наложена кривая снижения остаточных напряжений. Как следует из рисунка, на стадии нагрева остаточные напряжения в конструкции снижаются очень быстро, на стадии выдержки при постоянной температуре это снижение резко замедляется и, наконец, на стадии охлаждения происходит некоторое возрастание остаточных напряжений. В связи с тем что отпуск требует больших затрат тепловой энергии, экономически целесообразно, чтобы время выдержки не было слишком большим (как правило, не более 3 ч).

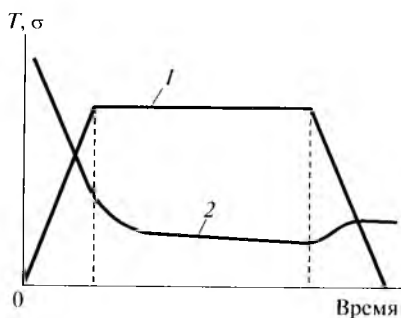


Рис. 7.34. Влияние температуры и длительности отпуска (1) на остаточные напряжения (2)

Для *отжига* сварных изделий используют электрические камерные печи, куда изделие помещается полностью, или нагревательные устройства, где нагрев осуществляется локально.

На рис. 7.35 в качестве примера приведена схема установки с программным управлением для локальной обработки сварных соединений труб, разработанная компанией «Weldtherm». Система полностью автоматизирована, что обеспечивает точность параметров термообработки.

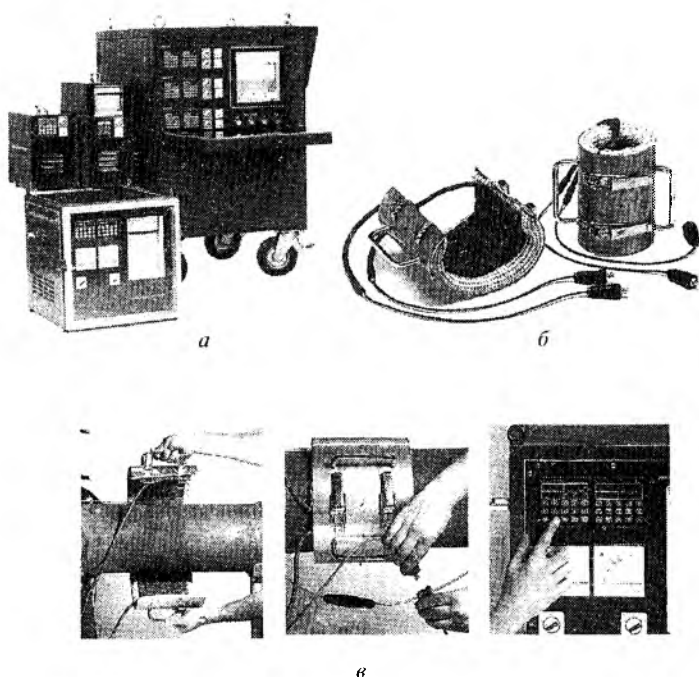


Рис. 7.35. Установка для локальной термообработки труб:

а — источник питания и аппаратура управления; *б* — муфты для отжига;
в — последовательность операций работы на установке

Для снижения остаточных напряжений используются также рассмотренные выше прокатка и проковка металла, а также сопутствующий подогрев. Снижение остаточных напряжений в сварных конструкциях может быть достигнуто также дробеструйной обработкой, ультразвуковой ударной обработкой, вибрационной обработкой.

Проковка является одной из разновидностей поверхностного пластического деформирования наплавленного металла и металла зоны термического влияния сварных соединений с целью изменения их механических свойств, формы и регулирования остаточных напряжений. Проковку можно проводить или по горячему металлу сразу после сварки, или после его остывания. Во всех случаях уменьшение толщины металла вызывает его расширение в перпендикулярном направлении, что

снижает напряжения растяжения в зоне проковки или вызывает напряжения сжатия. Проковка холодного металла сопровождается его наклепом и поверхностным упрочнением. При этом взамен растягивающих формируются сжимающие напряжения. Применение проковки с целью изменения напряжений может привести к ухудшению пластических свойств металла из-за наклепа.

Сначала проковку проводили посредством чеканки однобойковым инструментом в виде пневматического молотка, но производительность этого процесса была низкой. Для соединений с необрабатываемой после сварки поверхностью швов наиболее приемлем наклеп многобойковым инструментом. На рис. 7.36 дана схема одного из многобойковых инструментов, разработанных ЦНИИТМАШ. Многобойковый (пучковый) инструмент состоит из набора игл диаметром 1–3 мм и длиной 100–180 мм и позволяет получать глубину наклепанного слоя сталей средней твердости до 3 мм. Производительность при ручной работе с одним пучковым упрочнителем составляет 6–8 м/ч. Масса ручного многобойкового инструмента от 2 до 11 кг.

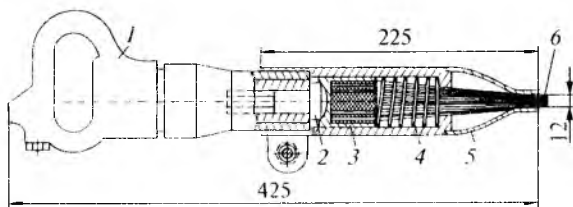


Рис. 7.36. Схема многобойкового (пучкового) пневматического инструмента:
1 – пневмомолоток; 2 – боек; 3 – стакан; 4 – пружина; 5 – наконечник; 6 – пучок игл

В отличие от однобойковых многобойковые инструменты позволяют вести обработку швов с большими неровностями: впадины и выступы хорошо проклепываются. Такая возможность появляется в связи со значительной длиной составляющих пучок игл и разной степенью их продольного изгиба в пучковых инструментах. Обработку многобойковым инструментом выполняют без пропусков до появления металлического блеска всей обрабатываемой поверхности сварного шва и зоны термического влияния. Степень наклепа определяется энергией и числом ударов по обрабатываемой площади.

Многолетний опыт промышленного использования подтвердил эффективность поверхностного наклепа для повышения сопротивления усталости сварных соединений разных машин и сооружений — сварных крановых и мостовых конструкций, сварных рам подвижного состава железных дорог, гребных судовых валов с наплавками, деталей машин с ремонтными заварками и наплавками. В настоящее время изучается возможность использования проковки для стабилизации геометрических размеров сварных конструкций при их эксплуатации после механической обработки.

Дробеструйная обработка — наклеп — осуществляется путем преобразования энергии сжатого воздуха в кинетическую энергию металлической дроби. Струя дроби характеризуется скоростью, которая зависит от давления сжатого воздуха и конструкции сопла и может достигать 70 м/с, и пространственным углом рассеивания струи дроби из сопла дробеструйного аппарата, которая является постоянной величиной и составляет 28—30°.

Дробеструйный наклеп стали позволяет получить глубину наклепанного слоя до 0,5—0,8 мм. Увеличение глубины наклепа возможно за счет повышения давления сжатого воздуха и усовершенствования конструкции дробеструйного аппарата. Преимуществами дробеструйного наклепа по сравнению с проковкой являются большая производительность и меньший шум.

Ультразвуковая (УЗ) ударная обработка основана на использовании эффектов акустического упрочнения и разупрочнения, возникающих в металле под воздействием УЗ-колебаний. В результате акустического разупрочнения уменьшаются статические напряжения, необходимые для пластической деформации, т.е. под влиянием УЗ-колебаний снижается предел текучести металла. Поэтому, воздействуя ультразвуком на зону сварного соединения, можно интенсифицировать пластические деформации и в результате взаимодействия УЗ-колебаний с растягивающими остаточными сварочными напряжениями существенно снизить последние.

При проявлении эффекта акустического упрочнения, вызванного воздействием УЗ-волн достаточно высокой интен

сивности, в поверхностных слоях металла возможно образование остаточных напряжений сжатия, что в ряде случаев положительно влияет на эксплуатационные характеристики сварных соединений. Схема ударной УЗ-обработки показана на рис. 7.37.

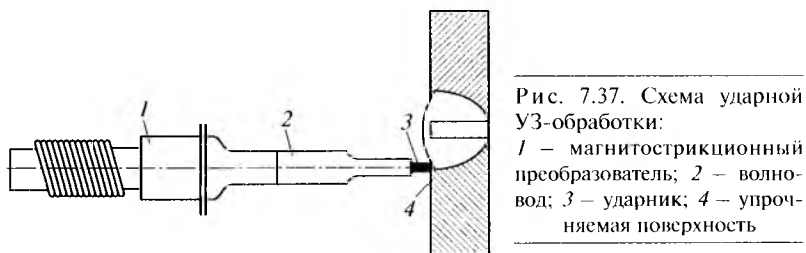


Рис. 7.37. Схема ударной УЗ-обработки:

1 — магнитострикционный преобразователь; 2 — волновод; 3 — ударник; 4 — упрочняемая поверхность

При ударной УЗ-обработке обычно используют ручной инструмент со встроенным магнитострикционным преобразователем, питающимся от УЗ-генератора мощностью до 2 кВт. В качестве рабочего органа выступает ударник, состоящий из набора стальных игл диаметром 1,6–1,9 мм и перемещаемый вдоль шва со скоростью около 0,5 м/мин. Масса рабочего инструмента уменьшается с повышением частоты УЗ-колебаний. Так, при частоте колебаний 27 кГц масса инструмента составляет 3 кг, а при 44 кГц — 0,5 кг.

Ударная УЗ-обработка позволяет существенно (на 50–300 %) повысить сопротивление усталости сварных соединений из низкоуглеродистых и высокопрочных сталей за счет стабилизации радиуса перехода усиления шва к основному металлу, снижения коэффициента концентрации напряжений, уменьшения шероховатости обработанной поверхности, создания в зоне обработки благоприятных сжимающих напряжений.

При ударной УЗ-обработке в 2–4 раза увеличивается сопротивление коррозионным и в 8–12 раз коррозионно-усталостным повреждениям сварных соединений из различных материалов, повышается размерная стабильность сварных соединений из различных конструкционных материалов.

К достоинствам ударной УЗ-обработки относят: низкие энергетические затраты по сравнению с местной термической обработкой и возможность ее замены;

- ◇ высокую эффективность при сравнительно небольших затратах;
- ◇ возможность выполнения ремонтных работ в условиях эксплуатации сварных изделий;
- ◇ мобильность, экологическую чистоту и производственную безопасность.

Однако ударную УЗ-обработку невозможно использовать в зонах, недоступных для обрабатывающего инструмента.

Основными областями использования ударной УЗ-обработки являются изготовление и ремонт сварных конструкций различного назначения — мостов, кранов, телевизионных башен, магистральных трубопроводов, буровых платформ, корпусов судов, деталей машин и механизмов.

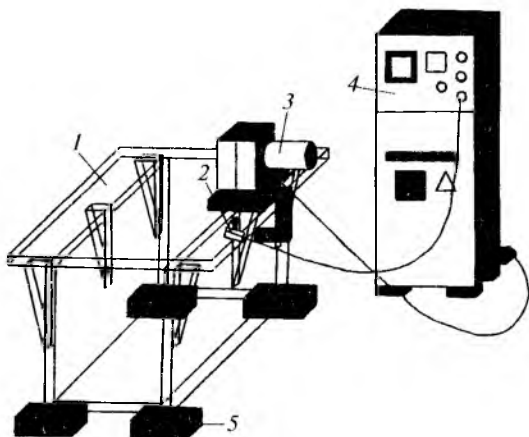


Рис. 7.38. Схема вибрационной обработки сварных конструкций

Вибрационный метод снижения остаточных напряжений является эффективным и недорогим. Метод реализуется в установке, схема которой показана на рис. 7.38. Металлоконструкция 1 установлена на виброизолирующих опорах 5, к ней прикреплен струбцинами или болтами вибровозбудитель 3 с регулируемой частотой колебаний. На пульте управления виброустановки 4 расположены приборы, регистрирующие частоту и амплитуду колебаний с помощью датчика 2, прикрепленного к сварной конструкции. Плавно изменяя частоту колебаний от минимальной до максимальной, регистрируют резонансные частоты системы сварная конструкция — вибро-

возбудитель и производят на выбранных резонансных частотах в диапазоне 10–120 Гц виброобработку длительностью, необходимой для снятия напряжений и составляющей несколько минут.

Основными параметрами вибрационной обработки являются амплитуда и время (длительность) вибронагружения. Чем выше амплитуда переменных напряжений, тем интенсивнее релаксация остаточных напряжений.

Виброобработке подвергают металлоконструкции из углеродистых сталей, чугунов, алюминиевых и титановых сплавов.

Зачистка сварных швов от шлака, графа и окалины, снятие усиления швов, удаление наплывов и т.п. производятся механизированно-ручными электрическими и пневматическими машинками (рис. 7.39), которые разделяются по назначению на шлифовальные зачистные, фрезерные и рубильные.

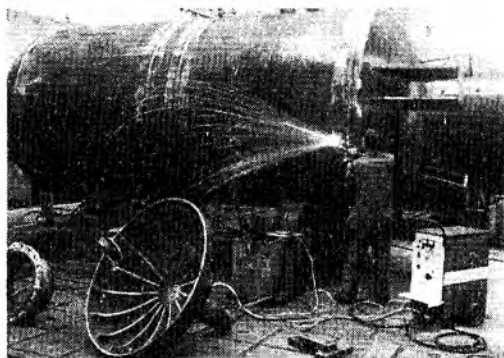


Рис. 7.39. Механизированная зачистка сварных швов емкости

7.7. Контроль качества сварных соединений

По ГОСТ 15467–79, *качество продукции* определяется как совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением.

Качество сварного соединения в зависимости от назначения изделия должно отвечать требованиям к таким показателям, как прочность и надежность, макро- и микрогеометрия

соединения и шва, дефектность соединения, структура и химический состав металла шва и др.

Согласно требованиям международной Системы менеджмента качества по ГОСТ Р ИСО 9000—2001, сварка относится к *специальным* процессам производства, т.е. к процессам, результаты которых нельзя в полной степени проверить последующим контролем, испытанием продукции или, например, когда дефекты могут быть выявлены только в процессе использования продукции.

От качества соединений во многом зависит работоспособность сварных изделий и конструкций, следовательно, их безопасность в процессе эксплуатации. В сварочном производстве доля исправления сварных швов (доля брака) довольно высока. На монтажных работах она может достигать 15—25 %, а в заводских условиях — 3—5 %. При неудовлетворительном качестве сварки затраты на ликвидацию последствий брака из-за отказов и аварий сварных изделий в большинстве случаев существенно превышают производственные затраты на технологические операции; иногда последствия брака могут быть катастрофическими. Поэтому роль контроля качества в процессе производства сварных конструкций трудно переоценить.

Качество сварных изделий зависит от ряда факторов: соответствия материала техническим условиям, состояния оборудования и оснастки, состояния нормативно-технической документации, соблюдения технологической дисциплины, квалификации работающих.

Сварные конструкции контролируют на всех этапах их изготовления.

После заготовительных работ детали подвергают чаще всего наружному осмотру — проверяют внешний вид, качество поверхности, наличие заусенцев, трещин, забоин и т.п., а также измеряют универсальными и специальными инструментами, шаблонами, с помощью контрольных приспособлений.

Особенно тщательно контролируют участки, которые будут подвергаться сварке. Профиль кромок, подготовленных под сварку, проверяют специальными шаблонами, а качество поверхности — с помощью оптических приборов или специаль-

ных микрометров. Во время сборки и прихватки проверяют расположение деталей друг относительно друга, зазоры, расположение и размер прихваток, отсутствие трещин, прожогов и других дефектов в местах прихваток и т.д. Качество сборки и прихватки определяют главным образом наружным осмотром и обмером.

Наиболее ответственным моментом является текущий контроль выполнения сварки. Организация контроля сварочных работ может производиться в двух направлениях — контролируют либо сами процессы сварки, либо полученные детали.

Контроль процессов позволяет предотвратить появление систематических дефектов и особенно эффективен при автоматизированной сварке. Контроль сварочных процессов можно осуществлять по образцам технологических проб или по регистрации параметров режима сварки.

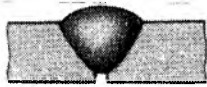
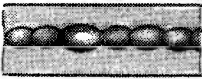
Контроль изделий производят пооперационно или после окончания изготовления. При контроле качества выполнения сварки обычно регламентируются: допустимые виды, форма, размеры и число дефектов; виды и объемы контроля — разрушающих и неразрушающих испытаний.

Дефекты сварных соединений и их влияние на работоспособность. *Дефектами сварных соединений* называют различные отклонения от установленных норм и технических требований, возникающие в процессе образования сварных соединений в металле шва и зоне термического влияния и приводящие к снижению эксплуатационной надежности сварных конструкций, ухудшению их работоспособности и внешнего вида.

В табл. 7.2 приведены основные виды дефектов сварных швов и причины их образования.

Дефекты сварных соединений в зависимости от места их расположения подразделяются на наружные — кратеры, наплывы, свищи, подрезы, прожоги, неравномерность формы шва — и внутренние — поры, включения шлака, непровары, несплавления, трещины, недопустимые структурные изменения металла — перегрев, пережог и др.

Таблица 7.2. Основные виды дефектов сварных швов и причины их образования

Вид и наименование дефекта	Причина дефекта	Вид и наименование дефекта	Причина дефекта
 Кратер	Обрыв дуги Неправильное выполнение конечного участка шва	 Подрез	Большой ток Длинная дуга При сварке угловых швов: смещение электрода в сторону вертикальной стенки
 Поры	Быстрое охлаждение шва Загрязнение кромок маслом, ржавчиной и т.п. Непросушенные электроды Высокая скорость сварки	 Непровар	Малый угол скоса вертикальных кромок Малый зазор между ними Загрязнение кромок Малый сварочный ток Завышенная скорость сварки
 Включения шлака	Грязь на кромках Малый сварочный ток Большая скорость сварки	 Прожог	Большой ток при малой скорости сварки Большой зазор между кромками Под свариваемый шов плохо поджата флюсовая подушка или медная подкладка
 Несплавления	Плохая зачистка кромок Длинная дуга Малый ток Большая скорость сварки	 Неравномерная форма шва	Неустойчивый режим сварки Неточное направление электрода

Окончание табл. 7.2

Вид и наименование дефекта	Причина дефекта	Вид и наименование дефекта	Причина дефекта
 Наплыв	Большой сварочный ток Неправильный наклон электрода Длинная дуга	 Трещины	Резкое охлаждение детали Высокие напряжения в жестко закрепленных конструкциях Повышенное содержание S или P
 Свищи	Низкая пластичность шва Образование закалочных структур Напряжения от неравномерного нагрева	 Перегрев (пережог) металла	Чрезмерный нагрев околошовной зоны Неправильный выбор тепловой мощности Завышенные значения тока или пламени

Наличие тех или иных дефектов в сварных соединениях еще не говорит о потере ими работоспособности. Опасность дефектов определяется влиянием не только их собственных характеристик (типы, виды, размеры, формы и т.п.), но и множества конструктивных и эксплуатационных факторов. В большинстве случаев степень влияния того или иного вида дефекта на работоспособность конструкций устанавливается испытанием образцов с дефектами. Например:

- усиление шва не снижает статической прочности, однако существенно влияет на усталостную прочность. Чем больше усиление шва и, следовательно, меньше угол перехода от основного металла к наплавленному, тем сильнее оно снижает предел выносливости;
- подрезы считаются допустимыми, если они имеют небольшую протяженность и ослабляют сечение шва не более чем на 5 %, в конструкциях, работающих под действием статических нагрузок;
- наплывы, резко изменяя очертания швов, образуют концентраторы напряжений, что может приводить к снижению вы-

носливости конструкции. Наплывы большой протяженности считают недопустимыми дефектами, так как они не только вызывают концентрацию напряжений, но и нередко сопровождаются непроварами;

- ♦ кратеры и прожоги являются недопустимыми дефектами и подлежат исправлению.

Исследования показали, что при статических нагрузках и пластических материалах потеря прочности примерно пропорциональна общей площади дефектов — включений и непроваров. Причем если общая площадь дефектов меньше 5–10 % (а иногда и 20–25 %), то они мало влияют на несущую способность стыков, особенно при швах с усилением. В то же время при малопластичных материалах и динамической или вибрационной нагрузках сравнительно небольшие дефекты существенно влияют на работоспособность соединения. Остаточные напряжения могут усиливать отрицательное влияние дефектов.

Для оценки опасности сварочных дефектов их целесообразно разделить на две группы:

- ♦ объемные (поры, шлаки, включения, непровары без подреза), не оказывающие значительного влияния на работоспособность соединений и нормируемые по размерам или площади ослабления сечения шва;
- ♦ трещиноподобные, в том числе трещины, весьма опасные и резко снижающие эксплуатационные свойства соединений.

Все дефекты по их значимости можно условно разделить на три группы:

- ♦ малозначительные — отдельные включения и непровары;
- ♦ значительные — протяженные дефекты;
- ♦ критические — трещиноподобные дефекты.

Поэтому в сварных швах допускается содержание объемных дефектов до определенных размеров и количеств. Трещиноподобные дефекты, как правило, считаются недопустимыми вне зависимости от их размеров.

Поэтому для получения сварных соединений высокого качества требования бездефектности и нормирования допустимых дефектов следует понимать как требование отсутствия не допустимых дефектов, а не их полного отсутствия вообще.

Методы неразрушающего контроля сварных соединений. При неразрушающих методах контроля, осуществляемых обычно на самих изделиях, оценивают те или иные физические свойства, лишь косвенно характеризующие качество, прочность или надежность соединения.

К неразрушающим методам контроля качества сварных соединений относят: визуальный и измерительный контроль, контроль на непроницаемость (герметичность) конструкций, контроль для обнаружения внутренних дефектов.

Визуальные и измерительные методы контроля сварных швов — наиболее простые и широко распространенные. Обычно внешним осмотром контролируют все сварные изделия независимо от применения других видов контроля. Во многих случаях внешний осмотр достаточно информативен и является наиболее дешевым и оперативным методом контроля.

Внешним осмотром невооруженным глазом или с помощью лупы выявляют прежде всего дефекты швов — трещины, подрезы, поры, свищи, прожоги, наплывы, непровары в нижней части швов. Сварные швы часто сравнивают по внешнему виду со специальными эталонами.

Геометрические параметры швов измеряют с помощью шаблонов (рис. 7.40) или измерительных инструментов. Замеряемые величины должны соответствовать техническим условиям (ТУ) или стандартам (ОСТам, ГОСТам и проч.).

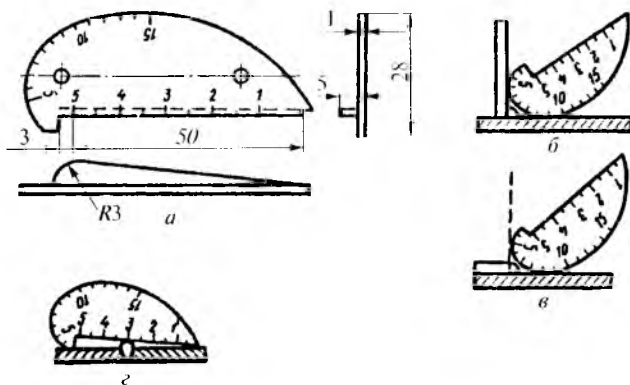


Рис. 7.40. Универсальный шаблон:

а — общий вид; *б*, *в* — измерение высоты углового шва; *г* — измерение высоты стыкового шва

Переносные видеоэндоскопы (рис. 7.41) используют для дистанционного визуального контроля поверхностей в труднодоступных местах (например, корень шва трубопровода). В комплект видеоэндоскопа входят зонд (катушка с зондом), источник света, блок пневматического управления гибким зондом, обеспечивающий изгиб (артикуляцию) зонда в широком диапазоне.

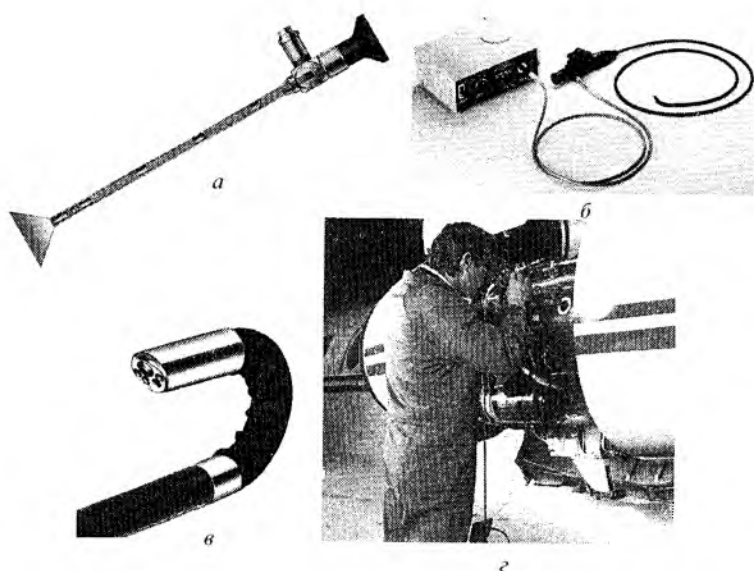


Рис. 7.41. Применение эндоскопов для контроля качества продукции:

а — оптическая система эндоскопа; *б* — общий вид эндоскопа с гибким световодом (флексоскопа); *в* — головка флексоскопа; *г* — диагностика авиационного двигателя

Внешний осмотр и обмер сварных швов являются высокоэффективным средством обнаружения дефектов, однако они не дают возможности окончательно судить о качестве сварки, так как определяют только внешние дефекты шва и позволяют установить его сомнительные участки, которые следует проверить другими методами.

Контроль на непроницаемость (герметичность) сварных швов является одним из требований, предъявляемых к изделиям замкнутого типа (сосудам, трубопроводам и т.п.). Непроницае-

мость сварных швов контролируют капиллярными, компрессионными и вакуумными методами.

Капиллярные методы контроля основаны на явлении капиллярного проникновения жидкости, обладающей высокой смачивающей способностью, в сквозные дефекты. При контроле на одну поверхность изделия, предварительно очищенную от загрязнений, обильно наносят проникающую жидкость, например керосин, а на другую — адсорбирующее покрытие в виде меловой обмазки, содержащей 350–480 г молотого мела (или каолина) в 1 л воды. После определенной выдержки контролируемое соединение осматривают, выявляя сквозные дефекты по желтым пятнам керосина на меловой обмазке. Метод керосиновой пробы позволяет выявить сквозные дефекты с эффективным диаметром более 0,1 мм.

Другие капиллярные методы течеискания основаны на применении пенетрантов — красок (цветной метод) или люминофоров (люминесцентный метод) и используются для выявления поверхностных дефектов, например трещин, имеющих раскрытие более 1 мкм, а по протяженности — соизмеримых со средним размером зерна сплава.

При проведении *люминесцентного контроля* на поверхность контролируемого изделия распылением или погружением наносят индикаторный пенетрант, способный проникать в дефекты 1 (рис. 7.42, а). В простейшем случае это смесь 15 % трансформаторного масла и 85 % керосина, которая светится под действием ультрафиолетовых лучей. Для улучшения пропитки полостей пенетрантом иногда применяют дополнительный нагрев, ультразвук, повышенное или пониженное давление (воздуха или инертного газа). После некоторой выдержки избытки пенетранта удаляют с контролируемой поверхности изделия, а поверхностные и сквозные дефекты 2 остаются заполненными пенетрантом (рис. 7.42, б). Затем на контролируемую поверхность наносят проявитель 3 (рис. 7.42, в) в виде порошка или суспензии (порошок талька или углекислого магния), который «вытягивает» оставшийся в поверхностном дефекте пенетрант. При этом пенетрант несколько расплывается над дефектным участком, образуя так называемый индикаторный след. Извлечение и локализация пенетранта у кро-

мок дефекта достигаются диффузионными и сорбционными силами проявителя.

Осмотр поверхности осуществляется при ультрафиолетовом облучении 4 (рис. 7.42, г). Люминесценция индикаторного раствора дает четкую контрастную картину поверхностных дефектов.

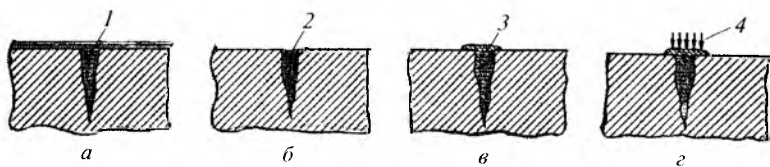


Рис. 7.42. Схема основных операций люминесцентной капиллярной дефектоскопии

В самопроявляющемся варианте после пропитки деталь нагревают и индикаторная жидкость, выходя из полостей, затвердевает, образуя следы дефектных полостей.

Цветной контроль, или *метод красок*, проводят по аналогичной технологии. На предварительно очищенную поверхность детали наносят слой подкрашенной проникающей жидкости. Затем следуют выдержка, промывка, сушка. Проявление осуществляют порошком или суспензией (например, 300–500 г каолина в 1 л воды или спирта). При просушивании краска («Судан» и др.) окрашивает каолин в красный цвет. Дефекты хорошо видны при осмотре поверхности шва простым глазом или через лупу, а мелкие — в микроскоп.

Компрессионные методы контроля основаны на создании в испытуемом изделии (замкнутой системе) избыточного давления пробного вещества (жидкости или газа) и регистрации на наружной поверхности изделия мест течи пробного вещества. В зависимости от типа пробного вещества различают жидкостные и газовые методы течеискания.

Жидкостный (гидравлический) метод течеискания применяется при проверке прочности и плотности различных сосудов, котлов, паро-, водо-, газопроводов и других сварных конструкций, работающих под избыточным давлением. Перед испытанием сварное изделие герметизируют водонепроницаемыми заглушками. Сварные швы с наружной стороны тщательно обтирают или обдувают сжатым воздухом до получения

сухой поверхности. После заполнения изделия водой создают испытательное давление (обычно в 1,5 раза больше рабочего) с помощью насоса или гидравлического пресса. Дефектные места определяют по появлению течи, просачиванию воды в виде капель или запотеванию наружной поверхности шва либо вблизи него. Такой метод контроля позволяет выявлять течи диаметром около 10^{-3} мм.

Разновидностью контроля гидравлическим давлением является люминесцентно-гидравлический метод, отличающийся тем, что в состав пробного вещества добавляют люминофор и осмотр наружной поверхности изделия проводят в ультрафиолетовом свете.

Иногда для лучшей выявляемости дефектов при гидравлическом методе контроля на наружную поверхность изделия наносят индикаторное покрытие, в состав которого входит вещество (например, динатриевая соль флуоресцина), люминесцирующее при попадании на него воды, или сорбент (например, крахмал), удерживающий воду длительное время.

Газовые методы течеискания, применяемые для испытания замкнутых объемов, более чувствительны, чем жидкостные, поскольку пробные вещества — газы — значительно легче проходят через мелкие сквозные дефекты. К газовым методам течеискания относятся: пузырьковый, химический, манометрический, газоаналитический и др.

Пузырьковый метод заключается в том, что сварные изделия погружают в бак с водой с таким расчетом, чтобы над изделием был слой воды 20—40 мм. После этого в изделие от воздушной сети или из баллона подают сжатый газ (воздух, азот, инертные газы) под давлением, на 10—20 % превышающим рабочее. Место течи регистрируют по появлению пузырьков (рис. 7.43). Если размеры изделия велики и в имеющуюся емкость оно не помещается, то наружную поверхность изделия покрывают пенообразующим веществом (мыльным раствором) и место течи фиксируют по мыльным пузырькам.

Химический метод основан на изменении окраски индикаторов — водного раствора азотнокислой ртути или спиртоводного раствора фенолфталеина — под воздействием щелочей (газа аммиака). В процессе испытаний наружную поверхность шва испытуемого изделия покрывают бумажной лентой или

светлой тканью, смоченными 5%-ным раствором азотнокислой ртути или раствором фенолфталеина. Затем в изделие подают смесь воздуха с 1–10 % аммиака. Бумагу (ткань) выдерживают 1–15 мин. Аммиак, проникая через сквозные дефекты, оставляет на бумаге в местах течи черные или фиолетовые пятна

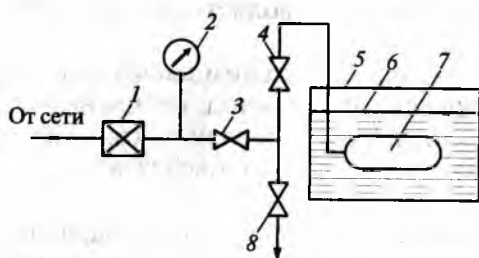


Рис. 7.43. Схема контроля пузырьковым методом:

1 – редукционный клапан; 2 – манометр; 3 – клапан; 4 – предохранительный клапан; 5 – бак; 6 – жидкость; 7 – контролируемое изделие; 8 – вентиль сброса давления

Манометрический метод заключается в регистрации изменения давления внутри сосуда, происходящего в случае его негерметичности, с помощью манометров за определенный период времени. Метод дает приближенную оценку герметичности, но зато может применяться для периодической проверки эксплуатируемого оборудования, работающего под давлением, без каких-либо дополнительных операций.

Газоаналитические методы контроля применяют для испытаний ответственных сварных конструкций, так как соответствующие течеискатели довольно сложны и дорогостоящи. В этих методах в качестве пробных используют газы фреон, гелий, водород и др., обладающие малой молекулярной массой и, следовательно, высокой проникающей способностью. При контроле, проходя сквозь мельчайшие неплотности сварных швов, они регистрируются течеискателями, которые по принципу действия бывают галогенными, катарометрическими и масс-спектрометрическими.

Галогенные течеискатели действуют на основании явления резкого увеличения эмиссии ионов с платинового анода, нагретого до 800–900 °С, в присутствии галогенов (например, фреона).

Катарометрический метод основан на измерении электрического сопротивления нагретой проволоки, изменяющегося в присутствии пробного газа, например гелия или водорода, от-

носительная теплопроводность которых по отношению к воздуху составляет соответственно 6 и 7 единиц.

Масс-спектрометрические, обычно гелиевые, течеискатели — наиболее чувствительные аппараты контроля герметичности. Индикация газа в них осуществляется с помощью масс-спектрометра. Молекулы гелия, попадая в масс-спектрометр, ионизируются и под действием магнитного поля приобретают круговую траекторию движения. Диафрагмы, расположенные на пути движения ионов, выделяют только ионы гелия, которые, попадая на коллектор, приводят к усилению ионного тока.

Схема установки для контроля гелиевым течеискателем приведена на рис. 7.44. В процессе контроля внутренний объем изделия заполняют гелием. Проникающий через неплотность в сварном шве пробный газ улавливается специальным щупом, передвигающимся по поверхности шва, и анализируется в течеискателе. По результатам анализа формируются электрический и звуковой сигналы. Сирена сигнализирует о появлении гелия в течеискателе, а отклонение стрелки миллиамперметра позволяет судить о размере неплотности.

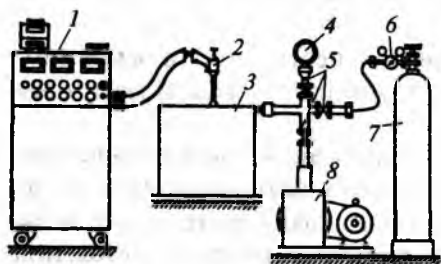


Рис. 7.44. Схема установки для контроля сварного шва на непроницаемость гелиевым течеискателем:

1 — гелиевый течеискатель; 2 — щуп-улавливатель; 3 — контролируемый сварной сосуд; 4 — вакуумметр; 5 — вентильные краны; 6 — газовый редуктор; 7 — баллон с гелием; 8 — вакуумный насос

Вакуумный метод используется для контроля сварных швов, которые невозможно испытать керосином, воздухом или водой и доступ к которым возможен только с одной стороны, и основан на регистрации падения вакуума в замкнутом объеме или на фиксации молекул пробного газа, появившихся в этом объеме. Его широко применяют при проверке сварных швов днищ резервуаров, газгольдеров и других листовых конструкций.

Наибольшее распространение получил контроль с использованием вакуумных присосок. В этом случае изделие заполня-

ется воздухом (или гелием) с небольшим избыточным давлением, а на его наружную поверхность, предварительно смоченную, например, мыльным раствором, накладывают вакуумную камеру, в полости которой создают разрежение (рис. 7.45). Контроль ведется либо по изменению давления в камере, которое отражается на показаниях вакуумметра, либо по появлению в камере гелия, фиксируемому с помощью гелиевого тепчеискателя.

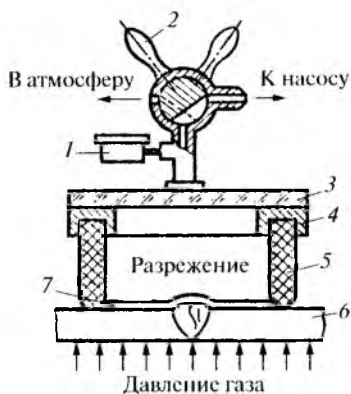


Рис. 7.45. Схема контроля герметичности с помощью вакуумной камеры:

1 — вакуумметр; 2 — трехходовой кран (в двух положениях); 3 — оргстекло; 4 — металлическая рамка; 5 — губчатая резина-уплотнитель; 6 — контролируемое сварное соединение; 7 — пленка пенообразующего вещества

Контроль внутренних дефектов осуществляется в основном с использованием радиационных, ультразвуковых и магнитных методов.

Радиационные методы контроля, надежные и широко распространенные, основаны на способности рентгеновского и гамма-излучения неодинаково проникать через различные материалы и поглощаться в них в зависимости от толщины, вида материалов и энергии излучения.

Рентгеновское излучение возникает в рентгеновской электронной трубке и состоит из тормозного и характеристического излучений. Рентгеновская трубка представляет собой стеклянный баллон, из которого откачан воздух (рис. 7.46) и в который впаяны два электрода — анод и катод. Катод, изготовленный из вольфрамовой проволоки в виде спирали, нагревается источником тока до высокой температуры и испускает электроны, которые приобретают необходимую кинетическую энергию под действием высокого напряжения (более 10 кВт), приложенного

к электродам. Электроны, попадающие на вольфрамовый (молибденовый) анод, тормозятся. При этом кинетическая энергия электронов частично превращается в энергию тормозного излучения, а большая ее часть (97 %) переходит в тепловую. Характеристическое излучение возникает при изменении энергетического состояния атомов в результате их взаимодействия с электронами или тормозным рентгеновским излучением.

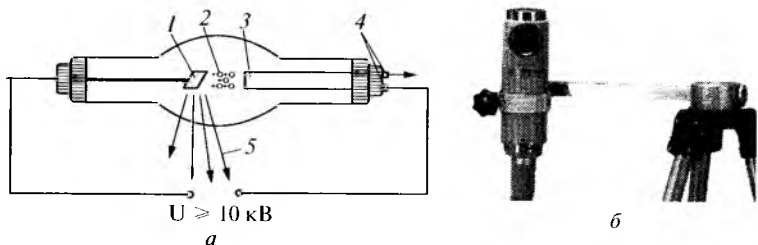


Рис. 7.46. Схема (а) и общий вид (б) рентгеновской трубки к установке МГ 103/4.5

Гамма-излучение образуется в результате распада ядер радиоактивных элементов (изотопов). Процесс распада объясняется тем, что внутриядерные силы притяжения между протонами и нейтронами не обеспечивают достаточной устойчивости ядра, вследствие чего наблюдается самопроизвольная перестройка ядер в более устойчивые. Этот процесс, называемый естественным радиоактивным распадом, сопровождается испусканием положительно заряженных α -частиц, отрицательно заряженных β -частиц и электромагнитного γ -излучения. Для дефектоскопии металлоконструкций используют главным образом γ -излучение, проникающая способность которого весьма велика (до 500 мм).

Естественными радиоактивными веществами являются радий, уран, торий и др., искусственными — изотопы кобальта, цезия, туллия, иридия и т.д.

При радиационных методах контроля для выявления дефектов в сварных швах с одной стороны изделия устанавливается источник излучения (рентгеновскую трубку или изотоп), а с другой — детектор, регистрирующий информацию о дефекте (рис. 7.47). Излучение от источника, проходя через сварное соединение с внутренним дефектом, в дефектном и бездефект-

ном местах поглощается по-разному и приходит на детектор с различной интенсивностью. Интенсивность излучения при прохождении через дефектные места, заполненные воздухом, газом или неметаллическими включениями, ослабляется меньше, чем в сплошном металле.

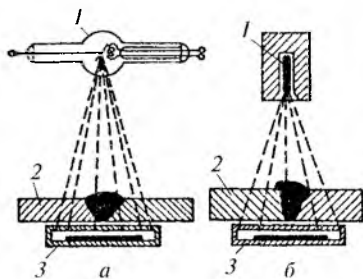


Рис. 7.47. Схема радиационного просвечивания швов:
а — рентгеновское; б — гамма-излучением; 1 — источник излучения; 2 — изделие; 3 — детектор

Методы радиационного контроля различают по способу отражения дефектоскопической информации (по виду детектора): радиография — с фиксацией изображения на рентгеновской пленке; радиоскопия — с наблюдением изображения на экране видеомонитора; радиометрия — с регистрацией электрических сигналов с помощью счетчиков (рис. 7.48).

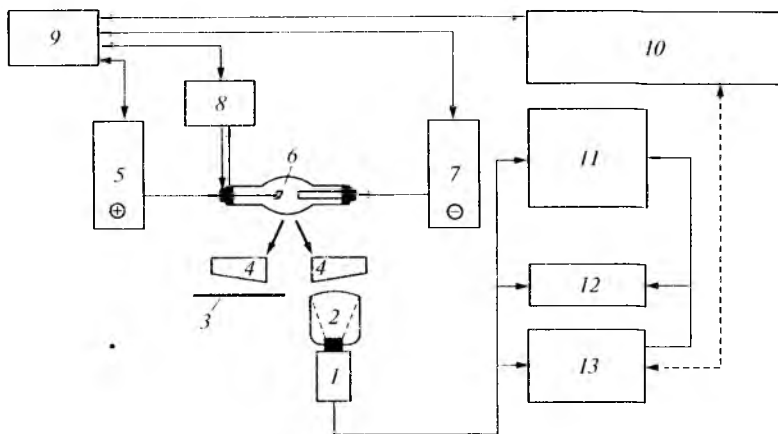


Рис. 7.48. Схема рентгеновской установки:

1 — видеокамера; 2 — видеоусилитель; 3 — рентгеновская пленка; 4 — изделие; 5 — высоковольтный генератор; 6 — рентгеновская трубка; 7 — высоковольтный генератор; 8 — охладитель; 9 — блок питания; 10 — устройство управления MGC 30; 11 — видеомонитор; 12 — интегратор; 13 — система обработки изображения

Общий вид нового поколения промышленных рентгеновских аппаратов импортного и отечественного производства показан на рис. 7.49.

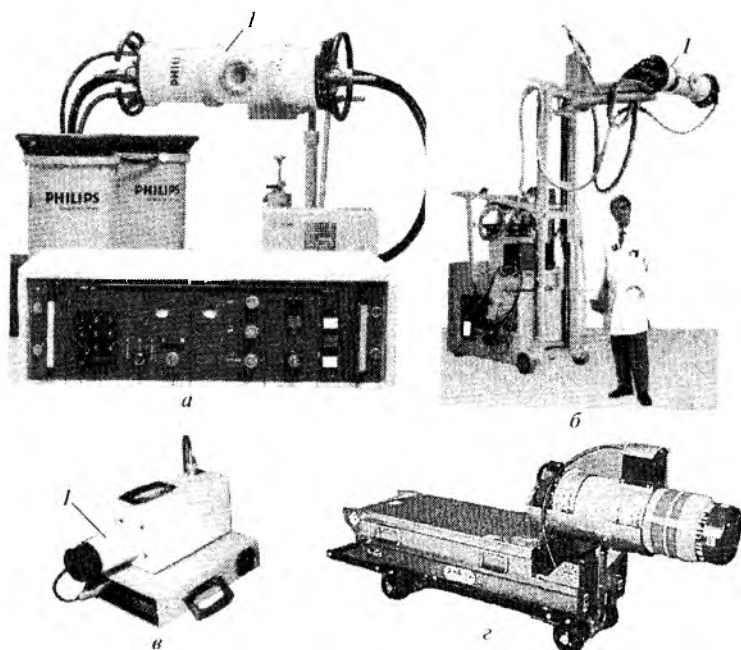


Рис. 7.49. Новое поколение рентгеновских аппаратов:

а, б — серии «Philips»; в — отечественный портативный импульсный серии «Арина»; г — рентгенографический кроулер серии ME24 (автономный самоходный рентгеновский комплекс для контроля сварных трубопроводов); 1 — рентгеновская трубка

Ультразвуковой (УЗ) контроль основан на свойстве УЗ-волн (частота колебаний 0,5–10 МГц) направленно распространяться в средах и отражаться от границ сред или нарушений сплошности (дефектов), обладающих другим акустическим сопротивлением.

В качестве излучателей и приемников ультразвука используют пьезопластины из пьезоэлектрической керамики или пьезокварца. Излучатели и приемники УЗ-волн называют пьезопреобразователями. При подаче на пьезопластину электрического напряжения она изменяет свою толщину. Если напряжение знакопеременно, то пластина колеблется в такт с этими

изменениями, создавая в окружающей среде упругие колебания. При этом пластина работает как излучатель. Наоборот, если пьезоэлектрическая пластина воспринимает импульс давления (отраженная УЗ-волна), то на ее обкладках вследствие прямого пьезоэлектрического эффекта появятся электрические заряды, которые могут быть измерены. В этом случае пьезопластина работает как приемник.

Электроакустические преобразователи, используемые для возбуждения и приема УЗ-колебаний, по конструкции подразделяют на совмещенные, у которых один пьезоэлемент служит излучателем и приемником, и раздельно-совмещенные с двумя пьезоэлементами в общем корпусе (рис. 7.50).

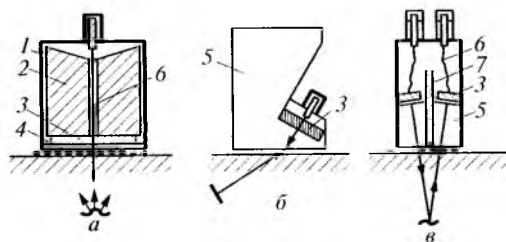


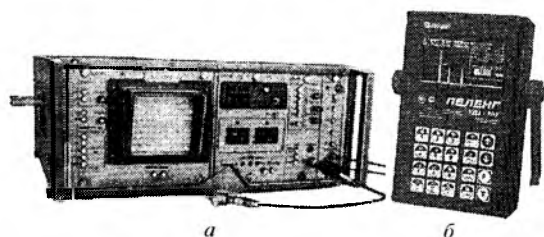
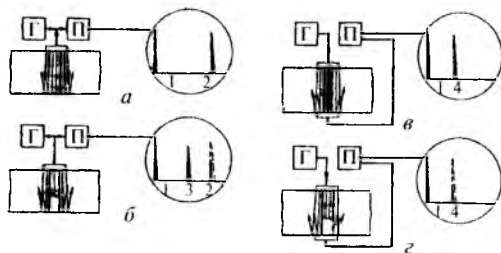
Рис. 7.50. УЗ-преобразователи:

a — прямой; *б* — наклонный (призматический); *в* — раздельно-совмещенный; 1 — корпус; 2 — демпфер; 3 — пьезопластина; 4 — защитное доннышко (протектор); 5 — призма; 6 — токоподвод; 7 — акустический экран

Эхо-импульсный метод довольно широко используют в практике контроля качества сварных соединений. Он заключается в «озвучивании» изделия короткими УЗ-импульсами 1 и регистрации сигнала 2, отраженного от противоположной (донной) поверхности изделия (рис. 7.51, *a*). Признаками дефекта являются появление эхо-сигнала (импульса) 3 на экране дефектоскопа и уменьшение сигнала 2 (рис. 7.51, *б*). В некоторых случаях УЗ-контроль целесообразно осуществлять теневым методом (рис. 7.51, *в*), которым признаком дефекта является уменьшение амплитуды сигнала 4, прошедшего от излучателя к приемнику (рис. 7.51, *г*). Теневым методом позволяет использовать не импульсное, а непрерывное излучение.

Аппаратура для УЗ-контроля состоит из электронного блока (собственно дефектоскопа), набора электроакустических

преобразователей и вспомогательных устройств. Электронный блок предназначен для генерирования зондирующих импульсов высокочастотного напряжения, усиления и преобразования эхо-сигналов, отраженных от дефекта, и наглядного отображения амплитудно-временных характеристик эхо-сигналов на экране электронно-лучевой трубки. Общий вид УЗ-дефектоскопов приведен на рис. 7.52.



Магнитные методы контроля основаны на обнаружении магнитных потоков рассеяния, возникающих при наличии дефектов в намагниченных изделиях из ферромагнитных материалов. Магнитный поток, распространяясь на изделия и встречая на своем пути дефект, огибает его вследствие того, что магнитная проницаемость дефекта значительно ниже (в 1000 раз), чем у основного металла. В результате этого часть магнитосиловых линий вытесняется дефектом на поверхность, образуя местный магнитный поток рассеяния (рис. 7.53).

Возмущение потока тем сильнее, чем большее препятствие представляет собой дефект. Так, если дефект расположен вдоль направления магнитных силовых линий, то возмущение магнитного потока невелико, но тот же дефект, расположенный перпендикулярно или наклонно по отношению к направлению магнитного потока, создает значительный поток рассеяния.

снятом усилении шва чувствительность контроля к указанным дефектам достигает 5 %. Этим методом значительно хуже выявляются округлые дефекты (поры, шлаковые включения), их размеры по высоте должны быть не менее 20 % толщины шва.

Диагностика сварных конструкций методами электронной широкографии и спекл-интерферометрии. *Электронная широкография* — наиболее интенсивно развивающийся в последние годы когерентный оптический метод исследования конструкций, который осуществляется с помощью простых оптических устройств и дает возможность бесконтактно исследовать поверхность объекта, не повреждая ее. Этот метод используется при исследовании различных материалов, конструкций и позволяет измерить деформацию объекта в условиях нагружения. Важным преимуществом электронной широкографии для неразрушающего контроля качества объектов является то, что она позволяет выявить концентрацию напряжений, вызванную присутствием дефекта и конструктивными особенностями объекта, в отличие от традиционных методов, которые только фиксируют наличие или отсутствие дефектов.

Суть метода электронной широкографии состоит в следующем. Контролируемый объект частично или полностью освещается с помощью лазера световой волной, которая при отражении от его поверхности попадает на сдвиговый элемент, размещенный перед объективом CCD-камеры, разделяя апертуру на две половины. При этом в плоскости изображения CCD-камеры появляются два смещенных изображения контролируемого объекта.



Рис. 7.57. Общий вид широкографической установки:

1 — компьютер; 2 — лазер; 3 — широкографический модуль

При выполнении неразрушающего контроля качества элементов и узлов конструкции используется компактная широкоформатная установка, в комплект которой входят источник освещения поверхности исследуемого объекта, широкоформатный интерферометр, формирующий изображение объекта, CCD-камера для записи и передачи изображения и компьютер для получения и обработки интерференционных картин (рис. 7.57).

При интерференции световых волн образуется оптическая микроинтерференционная спекл-картина, которая с помощью CCD-камеры вводится в компьютер. Полученные микроинтерференционные спекл-картины, записанные в двух состояниях объекта (до нагружения и после него), сравниваются и обрабатываются с целью получения макроинтерференционных полос — широкограмм. На рис. 7.58 показан общий вид контролируемой трехслойной стальной панели, сваренной точечной сваркой, и результаты оценки ее качества. Профили поверхности панели в сечении показывают места локализации дефектов размером приблизительно 5 мм, появление которых вызвано некачественной сваркой.

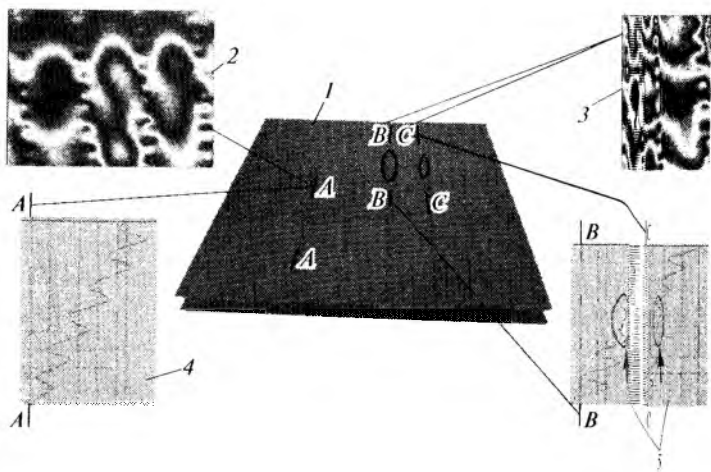


Рис. 7.58. Результаты контроля качества трехслойной сварки

1 — общий вид; 2, 3 — типичные интерференционные картины, полученные при контроле участков соответственно без дефекта и с дефектом; 4, 5 — изменения трехслойной от переменной плоскости конструкции вдоль выбранных сечений; дефекты выделены и показаны стрелками

Метод электронной спекл-интерферометрии основывается на использовании оптической схемы интерферометра, в которой исследуемый участок объекта освещается лазерным лучом под одним и тем же углом симметрично в двух направлениях, что позволяет определять компоненты вектора перемещений, которые характеризуют деформацию объекта в его плоскости.

Для определения остаточных напряжений в элементах и узлах конструкций на основе этой оптической схемы в ИЭС им. Е.О. Патона создана технология и разработан малогабаритный прибор, который устанавливается непосредственно на поверхность исследуемого объекта (рис. 7.59).

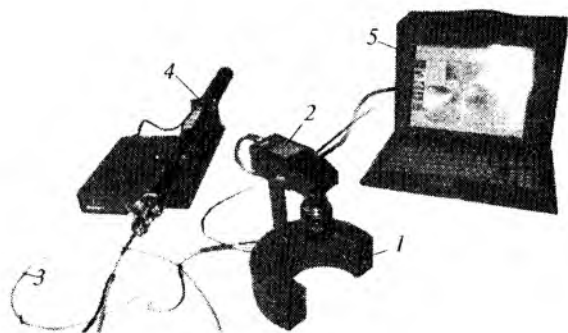


Рис. 7.59. Общий вид спекл-интерферометрической измерительной системы:

1 — спекл-интерферометр; 2 — CCD-камера; 3 — световод; 4 — лазер; 5 — компьютер

Измерение выполняют в следующей последовательности: 1) устанавливают спекл-интерферометр на поверхности объекта; 2) отраженная световая волна, характеризующая исходное состояние контролируемого участка, с помощью CCD-камеры преобразуется в аналоговый сигнал, который вводится в память компьютера; 3) выполняют упругую разгрузку напряжений путем сверления несквозного отверстия (его диаметр и глубина составляют 1,0—1,5 мм), и отраженная световая волна аналогичным образом вводится в память компьютера; 4) после компьютерной обработки данных об этих двух световых волнах на мониторе наблюдается интерференционная картина полос, расположенных вокруг отверстия, которая содержит информацию об остаточных напряжениях в контролируемой точке исследуемого объекта. Отклонение значений напряжений, определенных спекл-интерферометрическим методом, от расчетных не превышает 5 % предела текучести исследуемого материала.

На рис. 7.60 показан пример выполнения измерений технологических напряжений, возникших при изготовлении сварной полусферической оболочки переменной толщины диаметром 760 мм, применяемой в машиностроении.

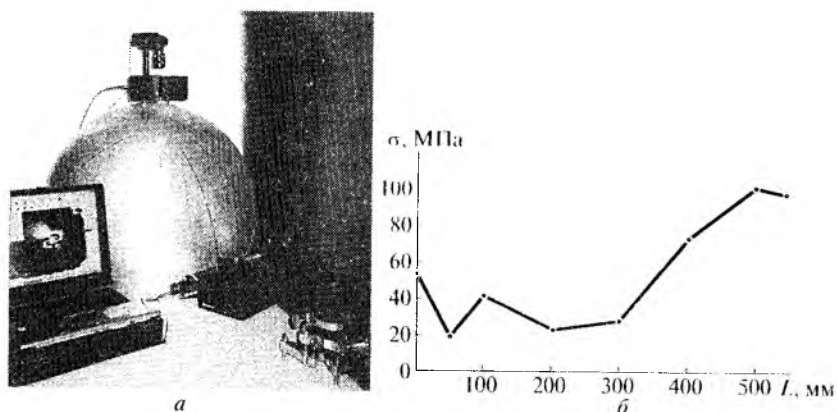


Рис. 7.60. Внешний вид полусферической оболочки переменной толщины (а) и распределение остаточных напряжений вдоль ее образующей L (б)

Методы разрушающего контроля. К разрушающим испытаниям сварных соединений принято относить: механические (на растяжение, изгиб, ударную вязкость и проч.), металлографические, коррозионные, химические. В особую группу выделяют безобразцовые испытания механических свойств металла. Например, на стыках труб действующих энергоблоков в зоне сварного шва металл периодически зачищают и осуществляют замер твердости, металлографические, рентгеноструктурные и другие испытания. При этом нарушают целостность материала, но не изделия в целом.

Механические испытания сварных соединений регламентированы ГОСТ 6996–66, который устанавливает порядок и основные методы определения механических свойств сварного соединения и его отдельных зон.

Основная задача механических испытаний — определение прочностных и пластических характеристик сварного соединения, без которых нельзя выполнить прочностный расчет сварной конструкции. Эти данные позволяют правильно вы-

брать материал для данной конструкции, определить вид и условия сварки.

Механические испытания бывают статические и динамические.

К *статическим* относятся испытания на растяжение, на изгиб, на твердость (микротвердость), на стойкость против хрупкого разрушения.

Испытания на одноосное растяжение наиболее распространены. По их результатам определяют сразу несколько простейших механических характеристик материала:

- ◇ предел текучести физический σ_T — наименьшее напряжение, при котором образец деформируется («течет») без заметного увеличения растягивающего усилия P :

$$\sigma_T = P_T / F_0,$$

где P_T — усилие, соответствующее пределу текучести; F_0 — исходная расчетная площадь сечения образца. Условным пределом текучести $\sigma_{0,2}$ называется напряжение, при котором остаточное удлинение образца достигает 0,2 % его начальной длины:

$$\sigma_{0,2} = P_{0,2} / F_0,$$

где $P_{0,2}$ — усилие, соответствующее пределу текучести;

- ◇ предел прочности (временное сопротивление) — напряжение, отвечающее наибольшей нагрузке $P_{\max}$, предшествующей разрушению образца:

$$\sigma_B = P_{\max} / F_0;$$

- ◇ относительное удлинение δ — отношение абсолютного удлинения образца к его первоначальной расчетной длине, выраженное в процентах:

$$\delta = [(l_k - l_0) / l_0] 100 \%,$$

где l_k — длина образца после разрыва; l_0 — исходная расчетная длина образца;

- ◇ относительное сужение ψ — отношение абсолютного сужения, т.е. уменьшения площади поперечного сечения образца после разрыва ($F_0 - F_k$), к первоначальной площади его поперечного сечения, выраженное в процентах:

$$\psi = [(F_0 - F_k) / F_0] 100 \%,$$

где F_k — площадь поперечного сечения образца после разрыва.

Относительные удлинение и сужение характеризуют пластичность металла.

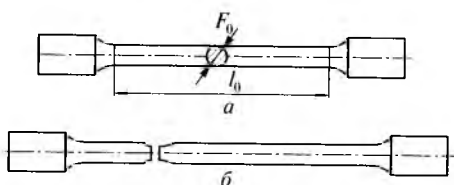


Рис. 7.61. Гагаринский образец для испытаний на растяжение:

a — до испытания; *б* — после испытания

Характеристики σ_T , $\sigma_{0,2}$, δ , ψ можно получить при растяжении цилиндрического образца (рис. 7.61) на испытательной машине (рис. 7.62) с одновременной записью растягивающего усилия P , приложенного к образцу, и деформации образца Δl .

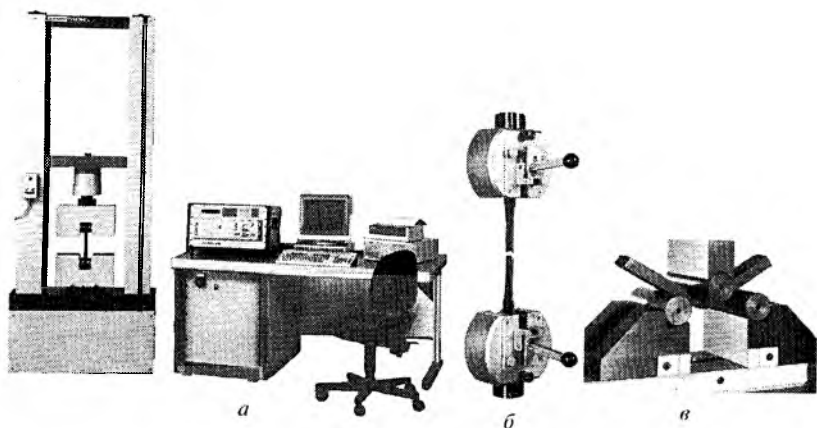


Рис. 7.62. Универсальная электромеханическая испытательная машина серии RSA компании «Schenck»: общий вид установки (*a*) и оснастка для испытания на разрыв (*б*) и на угол загиба (*в*)

Типичная диаграмма растяжения для стали в координатах $P\Delta l$ приведена на рис. 7.63. Прямолинейный участок диаграммы отражает пропорциональную связь между усилием растяжения и упругой деформацией. Далее развивается пластическая деформация стали, и максимум на кривой в точке *D* соответствует наибольшей нагрузке $P_{\max}$, предшествующей

разрушению образца. В точке E образец разрушается. Если провести прямую, параллельную AB , из любой точки диаграммы в области пластической деформации, то на оси абсцисс получим остаточную деформацию образца Δl^* .

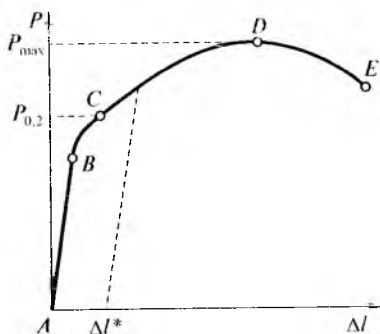


Рис. 7.63. Диаграмма растяжения

Для исследования свойств металла сварного соединения из него вырезают образцы (рис. 7.64): гагаринские (рис. 7.60, a); образцы для определения относительной прочности шва в сравнении с основным металлом без снятия усиления шва (рис. 7.65, a); образцы для определения абсолютного значения σ_b со снятым усилением и специальной выточкой шва, предохраняющей место разрушения (рис. 7.65, b).

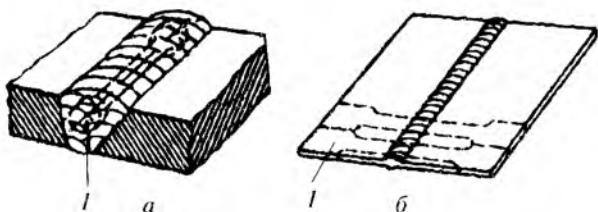


Рис. 7.64. Схемы вырезки образцов l из сварного шва (a) и сварного соединения (b)

При испытании на изгиб (рис. 7.66) определяют угол загиба: при образовании первой трещины в растянутой зоне образца, который дает представление о пластических свойствах соединения в целом. Испытания на угол загиба проводят на универсальной испытательной машине, используя специальное приспособление (рис. 7.62, $в$).

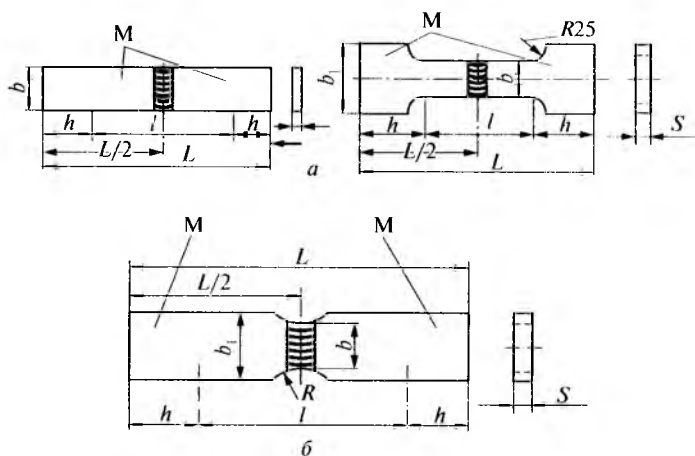


Рис. 7.65. Образцы для определения относительной (а) и абсолютной (б) прочности шва (М — место маркировки)

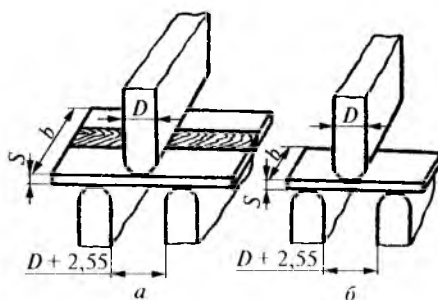


Рис. 7.66. Схема испытания на изгиб сварного образца при расположении шва: а — продольном; б — поперечном

Испытание на твердость (микротвердость) основано на свойстве металла оказывать сопротивление пластической деформации при контактном воздействии в поверхностном слое. Измерение твердости получило весьма широкое применение вследствие быстроты и простоты осуществления, а также возможности без нарушения целостности изделия судить о свойствах металла. Твердость определяют по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу.

Сущность метода определения твердости по Бринеллю заключается во вдавливании стального шарика диаметром D в

образец (изделие) под действием нагрузки P и измерении диаметра отпечатка d после снятия испытательной нагрузки (рис. 7.67, а). Чем меньше диаметр отпечатка, тем выше твердость металла.

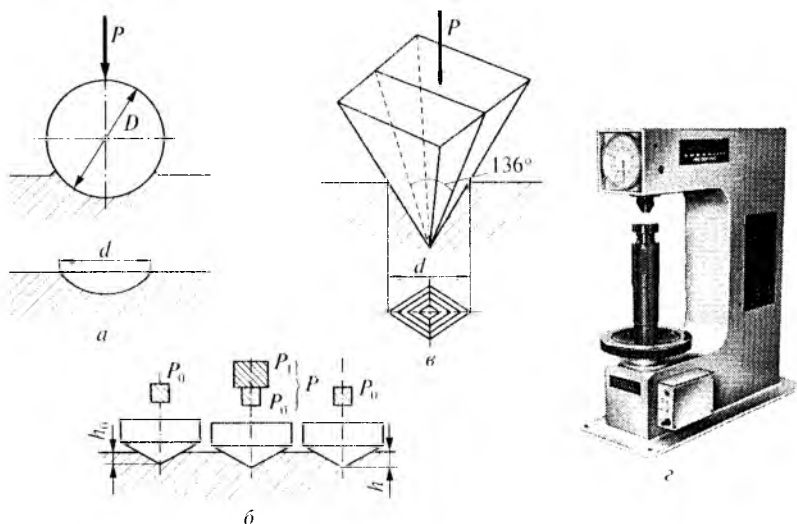


Рис. 7.67. Схемы определения твердости по Бринеллю (а), Роквеллу (б) и Виккерсу (в) и общий вид прибора для измерения твердости компании «Tarnotest» (г)

В методе определения твердости по Роквеллу в образец вдавливают наконечник (индентор) с алмазным конусом с углом у вершины 120° (при испытании твердых металлов) либо стальной закаленный шарик диаметром 1,588 мм (при испытании мягких металлов) (рис. 7.67, б). Под нагрузкой P_0 индентор прибора вдавливается в образец на глубину h_0 . Затем на испытуемый образец подается нагрузка $P = P_0 + P_1$ и глубина погружения наконечника возрастает. После снятия основной нагрузки P_1 прибор показывает число твердости по Роквеллу HR, которое определяется по осевому перемещению индентора.

Твердость по Виккерсу определяют путем вдавливания алмазного наконечника, имеющего форму правильной четырехгранной пирамиды, в образец (изделие) под действием нагрузки P и измерении диагонали отпечатка d , оставшегося после снятия нагрузки (рис. 7.67, в).

Микротвердость (твердость в микроскопически малых объемах) определяют при исследовании отдельных структурных составляющих сплава. Соответствующий прибор состоит из механизма для вдавливания алмазной пирамиды под небольшой нагрузкой и металлографического микроскопа. Твердость определяется по диагонали отпечатка алмазной пирамидки.

Испытания на хрупкость. Хрупким называют разрушение, при котором пластические деформации намного меньше упругих. Такое разрушение характерно для условий работы, при которых из-за наличия острых концентраторов, отрицательных температур и других факторов тормозится процесс развития пластической деформации. Этот характер разрушения опасен тем, что при сравнительно невысоких напряжениях возможно лавинообразное распространение трещины через все сечение конструкции.

Стойкость против хрупкого разрушения зависит от сопротивления металла отрыву, и ее оценивают по критерию вязкости разрушения K_{IC} . Этот показатель определяют путем испытания статическим изгибом образца с надрезом (рис. 7.68), в вершине которого имеется искусственная усталостная трещина. Образец нагружают до момента нестабильного развития трещины. Затем по нагрузке и длине трещины рассчитывают коэффициент интенсивности напряжений по критерию вязкости (хрупкости) разрушения K_{IC} .

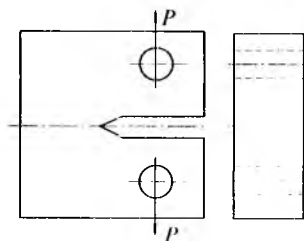


Рис. 7.68. Образец для определения коэффициента интенсивности напряжений K_{IC}

К *динамическим* относятся испытания на ударный изгиб и усталость.

Испытания на ударный изгиб (рис. 7.69) выявляют склонность металла к хрупкому разрушению в заданной зоне соединения. Метод основан на разрушении образца с концентратором (рис. 7.69, в) ударом маятникового копра (рис. 7.69, а, б).

По шкале копра определяют полную работу K , затраченную при ударе (работа удара):

$$K = Ph_1(\cos\beta - \cos\alpha).$$

Под ударной вязкостью понимают работу удара, отнесенную к начальной площади поперечного сечения S_0 образца в месте концентратора: $K_c = K/S_0$.

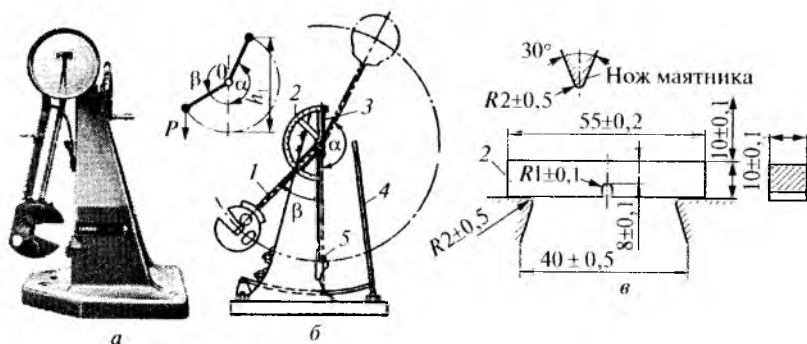


Рис. 7.69. Общий вид (а) и схема (б) маятникового копра и схема испытания на ударный изгиб образца с концентратором (в):

1 — маятник; 2 — шкала; 3 — стрелка шкалы; 4 — тормоз; 5 — образец

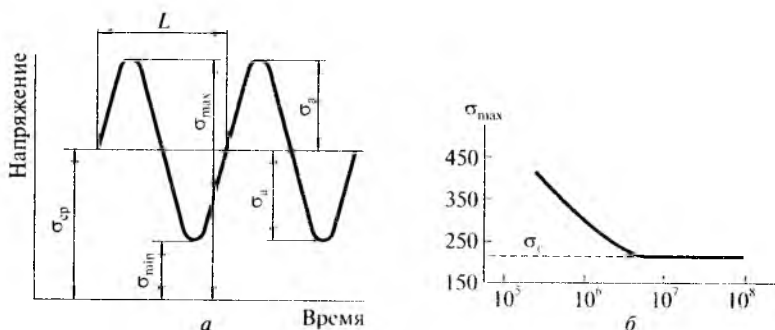


Рис. 7.70. Характер нагрузок при циклических испытаниях (а) и кривая усталости в полулогарифмических координатах с определением предела выносливости на базе 10^7 циклов (б)

Усталостные испытания по числу циклов до разрушения образца подразделяют на малоцикловые (обычно $N = 100 - 5 \cdot 10^4$) и многоцикловые (как правило, $N \geq 10^6$). Определяют способ-

ность соединений сопротивляться действию переменных нагрузок (рис. 7.70, *а*) при изгибе, растяжении и кручении. Форма образцов зависит от этих нагрузок и вида соединений. При испытании могут определять также предел выносливости σ_t — наибольшее напряжение, при котором образец не разрушается за заданное число циклов — базу испытания (рис. 7.70, *б*).

Металлографический анализ проводят для определения структуры сварного соединения и выявления реальных размеров дефектов сварного шва. Полный металлографический анализ сварного соединения состоит из исследования макро- и микроструктуры металла шва, зоны термического влияния и основного металла.

При *макроанализе* исследуют макроструктуру, строение металла, видимое без увеличения или при небольшом увеличении (с помощью лупы). Для этого из сварного соединения вырезают образцы (темплеты) в определенном месте и определенной плоскости. Поверхность образца шлифуют и подвергают травлению специальными реактивами (в большинстве случаев растворами кислот высокой концентрации). Травители по-разному растворяют составляющие структуры, что позволяет выявить, например, сварной шов, его дендритное строение и геометрические размеры (рис. 7.71, *а*). Дефекты, нарушающие сплошность металла, выявляются потому, что реактивы растравливают трещины, поры, раковины и проч.

Микроскопический анализ применяют с целью:

- ♦ определения формы и размеров зерен, из которых состоит сплав;
- ♦ обнаружения изменений внутреннего строения сплава, происходящих под влиянием термического цикла сварки;
- ♦ выявления дефектов сварного соединения — микропор, микротрещин и т.п.;
- ♦ обнаружения неметаллических включений — сульфидов, оксидов и др.

Для микроанализа из исследуемого сварного соединения вырезают образец; исследуемую поверхность подвергают шлифованию, полированию (механическому, электролитическому), травлению. Подготовленная поверхность называется микрошлифом.

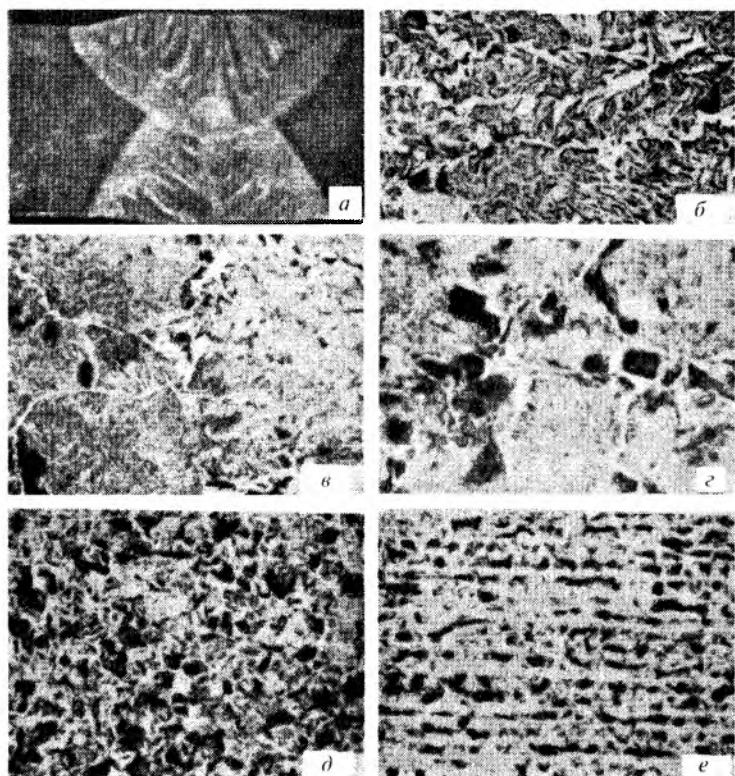


Рис. 7.71. Макро- (а) и микроструктуры (б–е) сварного соединения из листовой стали толщиной 20 мм (сварка пол слоём флюса с двух сторон без скоса кромок):

б — структура металла шва (вверху и внизу); в — структура непосредственного перехода от основного металла к шву; г — структура участка перегрева; д — структура участка нормализации; е — структура металла, не подвергнувшегося термическому влиянию сварки (а–е — $\times 100$)

Для исследования структуры металлов и сплавов на микрошлифах применяют металлографические микроскопы (рис. 7.72). По своей оптической схеме микроскоп состоит по крайней мере из двух отдельных оптических систем — окуляра, располагающегося в непосредственной близости к глазу, и объектива, обращенного к объекту исследования — микрошлифу. Объектив дает действительное увеличение промежуточного изображения объекта, которое увеличивается окуляром, т.е. изображение увеличивается дважды. Общее увеличение представляет

собой произведение увеличений объектива и окуляра. Оптические микроскопы дают увеличение до 1500 раз.

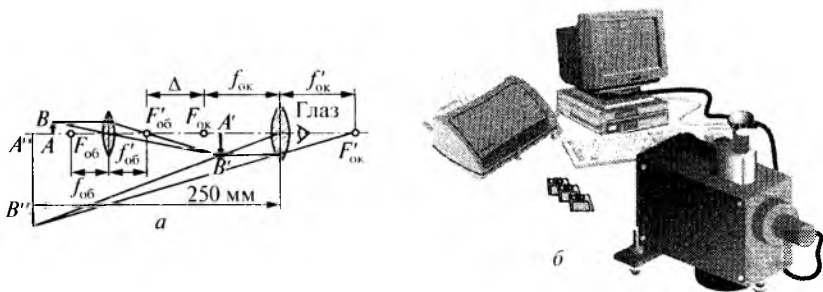


Рис. 7.72. Оптическая схема (а) и общий вид портативного металлографического микроскопа серии «MicroVision» (б):

1 — объектив; 2 — окуляр

Микроструктуры сварного соединения из ферритно-перлитной стали даны на рис. 7.71, б–е. Из анализа фотографий следует, что структура металла вверху и внизу (рис. 7.71, б) состоит из лучистых кристаллов верхнего бейнита, окруженных полосами феррита и перлита. В структуре перехода от основного металла к шву (рис. 7.71, в) слева виден крупнозернистый бейнит зоны перегрева, справа — бейнит металла шва. Структура участка перегрева, расположенного непосредственно рядом со швом, содержит до 80 % крупнозернистого бейнита, а также около 10 % феррита и 10 % перлита (рис. 7.71, г). Структура зоны, где металл нагревался выше температуры A_{c3} (рис. 7.71, д), состоит из феррита и перлита. Основной металл, не подвергавшийся термическому влиянию сварки, имеет строчечную ферритно-перлитную структуру (рис. 7.71, е).

При необходимости большего увеличения используют электронные микроскопы (рис. 7.73), которые обеспечивают увеличение до 200 000 раз и работают по схеме проходящих электронных лучей. Вместо стеклянных линз в электронном микроскопе установлены электромагнитные линзы, преломляющие электронные лучи. Источником электронов служит раскаленная вольфрамовая нить. Так как электронный микроскоп предназначен для исследования объектов в проходящих электронных лучах, то предмет исследования должен быть очень тонким. Поэтому при исследовании используются не са-

ми образцы, а тонкие пленки-реплики, воспроизводящие рельеф поверхности микрошлифа.

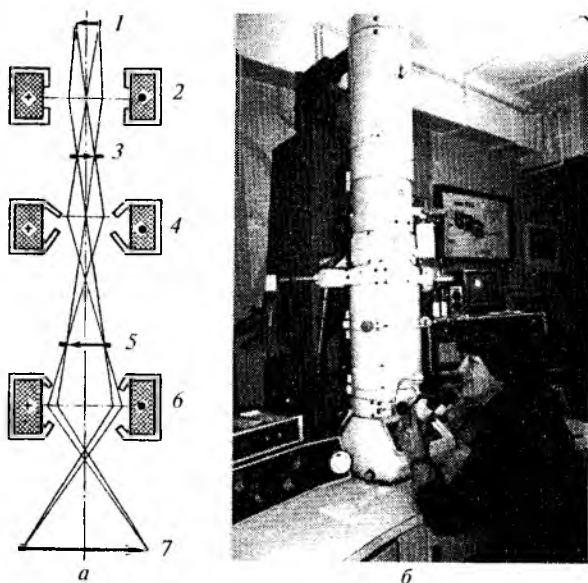


Рис. 7.73. Схема (а) и общий вид (б) электронного микроскопа просвечивающего типа:

1 — источник электронов; 2 — конденсаторная линза; 3 — объект; 4 — объективная линза; 5 — промежуточное изображение; 6 — проекционная линза; 7 — конечное изображение

На изломах сварного соединения структуру можно анализировать с помощью сканирующих растровых электронных микроскопов (рис. 7.74), использующих *фрактографический* метод — исследование объектов в отраженных от поверхности электронных лучах.

Изломы сварных соединений исследуют после механических испытаний образцов (рис. 7.75 и 7.76) и после разрушения сварных конструкций. По излому можно определить характер разрушения — пластическое или хрупкое, а также выявить дефекты — поры, трещины, неметаллические включения и т.п. Если металл пластичен, то под воздействием растягивающих усилий его разрушение происходит в результате зарождения, развития и слияния микропор. В этом случае поверхность разрушения характеризуется типичным ямочным (чашечным) рельефом (рис. 7.75) и

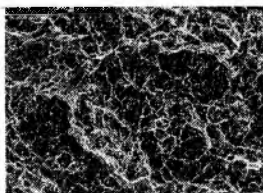
чем больше размеры ямок, чем они глубже, тем большим запасом пластичности обладает металл. При хрупком разрушении в изломе присутствуют фасетки скола (рис. 7.76).



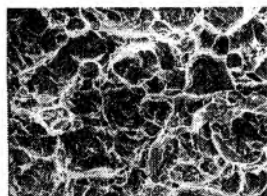
Рис. 7.74. Общий вид растрового электронного микроскопа



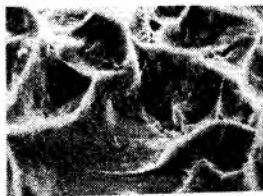
a



б



в



г

Рис. 7.75. Топография поверхности разрушения образца из основного металла:
a — $\times 20$; *б* — $\times 500$;
в — $\times 2000$; *г* — $\times 10\,000$

Испытания на коррозию проводят для определения коррозионной стойкости сварного соединения или отдельных его зон при работе в разных средах. Различают испытания на общую коррозию и местную.

Общая коррозия характерна для углеродистых и низколегированных сталей и является результатом растворения металла в агрессивной среде. По своему характеру общая коррозия бывает:

- ♦ *равномерная*, когда с одинаковой скоростью разрушается основной металл и металл шва;

- ◇ **неравномерная**, когда быстрее разрушается металл шва или в определенных местах основной металл и металл по линии сплавления.

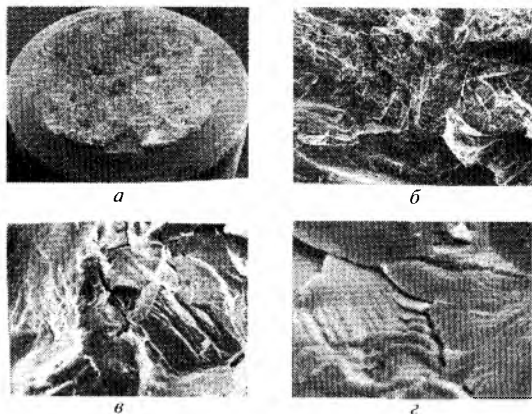


Рис. 7.76. Топография поверхности разрушения образца из сварного шва:
a — $\times 23$; *б* — $\times 300$;
в — $\times 2000$; *г* — $\times 10\,000$

Основные методы оценки коррозионной стойкости металла даны в ГОСТ 13819—68:

- ◇ **гравиметрический**, заключающийся в том, что сваривают две пластины, а затем разрезают на полосы-образцы шириной до 15 мм каждая. Образцы очищают от окалины, заусенцев, взвешивают и погружают в сосуды с кислотой (азотной, серной или соляной) различной концентрации. По истечении определенного времени (6—48 ч в зависимости от металла и концентрации кислоты) образцы вынимают и повторно взвешивают. О развитии процесса коррозии судят по потере массы образцов;
- ◇ **профилографический** — определение степени коррозии сварных соединений по профилограммам, которые строятся для каждого образца на основании измерения профиля поверхности стрелочным индикатором до воздействия на металл агрессивной среды и после него с последующим сравнением результатов измерения;
- ◇ **электрохимический** — установление разницы потенциалов между отдельными зонами сварного шва в той или иной коррозионной среде;
- ◇ **метод механических испытаний на растяжение и изгиб** — сравнение прочностных и пластических свойств образцов до коррозионных испытаний и после них.

Местная коррозия может развиваться в зоне термического влияния основного металла на некотором удалении от шва (по линии сплавления основного металла с металлом шва), а также в металле шва и обусловлена нагревом металла отдельных зон сварного соединения до определенных температур. Этому виду коррозии подвержены аустенитные и аустенитно-ферритные стали. Существует несколько методов оценки местной коррозии, регламентированных ГОСТ 6032–75.

Химический анализ служит для отбраковки материалов по составу и установления причин появления дефектов в сварном соединении. При исследовании сварных соединений обычно производят химический анализ основного, присадочного (электродного и проволоки) и наплавленного металла шва.

Химический состав металла может быть определен с помощью *спектрального анализа*. При этом на поверхности образца зажигают дугу, пары металла, попадающие в дугу, дают свой, присущий им спектр, который разлагают на аналитические линии. Сравнивая эти линии с эталонными, находят количественный и качественный состав элементов в сплаве.

При химическом анализе металла шва определяют, находится ли содержание углерода, кремния, марганца и других легирующих элементов в пределах, которые регламентированы технической документацией (ГОСТ, ОСТ и проч.). Кроме того, важно установить, что содержание вредных элементов (примесей — серы, фосфора и т.п.) в стали не превышает допустимого. В некоторых случаях, особенно при разработке нового состава покрытия или технологии сварки, проводят также анализ шва на содержание азота, кислорода и водорода.

7.8. Применение компьютерных технологий в сварочном производстве

В сварке как одном из основных технологических процессов современного машиностроения широко применяются новые информационные технологии и системы автоматизированного проектирования (САПР), объединяющие технические средства, математическое и программное обеспечение.

Под *автоматизацией проектирования* понимается такой способ разработки проекта, когда проектные процедуры и операции осуществляются разработчиком изделия при тесном взаимодействии с компьютером. Автоматизация проектирования предполагает систематическое использование компьютерных средств при рациональном распределении функций между проектировщиком и компьютером и обоснованном выборе методов машинного решения задач. Рациональное распределение функций между человеком и компьютером подразумевает, что человек должен решать в основном задачи творческого характера, а компьютер — задачи, допускающие формализованное описание в виде алгоритма. Существенное преимущество машинных методов проектирования состоит в возможности проводить компьютерные эксперименты на математических моделях объектов проектирования, отказавшись от дорогостоящего физического моделирования или значительно его сократив.

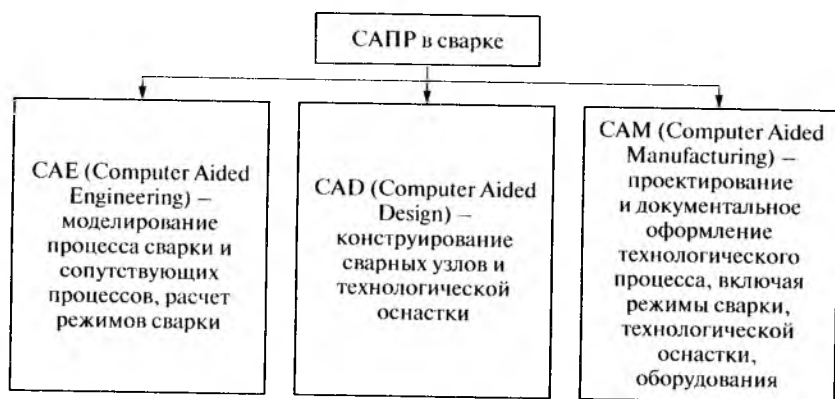


Рис. 7.77. Схема использования САПР в сварочном производстве

Компьютеризация охватывает практически все сферы научно-технической и инженерной деятельности в сварочном производстве. Схема основных направлений использования в сварке САПР на основе компьютерных средств представлена на рис. 7.77.

Моделирование на основе численных методов и метода конечных элементов является важным направлением САПР.

Компьютерное моделирование широко используется для описания физических процессов, протекающих в условиях ускоренного нагрева и охлаждения металла при сварке. В качестве математической основы для современных вычислительных комплексов инженерного анализа в последнее время успешно применяется метод конечных элементов (МКЭ).

Пример компьютерного разбиения детали на конечные элементы представлен на рис. 7.78.

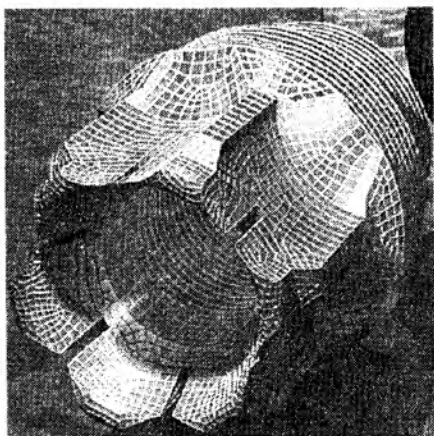


Рис. 7.78. Компьютерная твердотельная модель детали, разбитой на конечные элементы

Такие вычислительные комплексы составляют отдельное направление развития компьютерных технологий, получившее наименование САЕ-системы (САЕ-технологии), например, в сфере сварки разработан мощный программный комплекс Msc.Marc.

Сначала с использованием МКЭ решались задачи нестационарной теплопроводности (рис. 7.79), что позволяло делать вывод об изменении свойств металла зоны термического влияния в зависимости от режимов сварки или резки. При этом рассчитывались и размеры участков зоны с различными структурами.

Развитие компьютерного моделирования в настоящее время связано во многом с изучением сварочных деформаций и напряжений (рис. 7.80). Эти задачи требуют проведения совместного термического и механического анализа. На основе последних разработок в моделировании процессов сварки воз-

можно решение вопросов надежности и долговечности сварных конструкций, прогнозирование процесса образования и развития усталостных трещин.

Inc : 212
Time : 5.325e+01

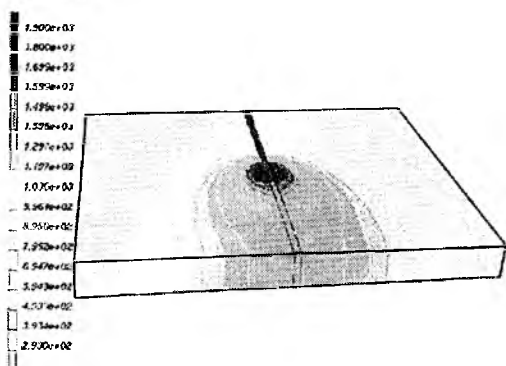


Рис. 7.79. Изображение на компьютере нестационарного температурного поля, характерного для процесса сварки

Как известно, промышленное оборудование для управления процессом сварки позволяет контролировать процесс по уже заложенному в него производителем алгоритму. Однако при проведении исследований и проектировании новых систем управления часто необходимо строить принципиально новые схемы, алгоритм работы которых может не поддерживаться стандартной аппаратурой. Кроме того, к недостаткам использования стандартной аппаратуры управления следует отнести невозможность детальной записи и последующего замедленного воспроизведения потока данных, получаемых при сварке на экспериментальной установке.

Inc : 740
Time : 1.220e+03

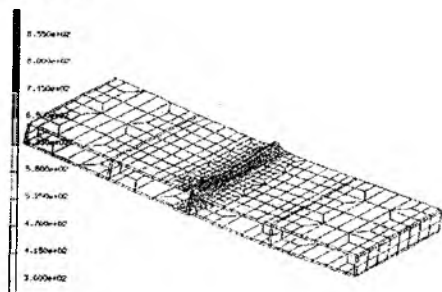


Рис. 7.80. Компьютерный расчет остаточных сварочных деформаций

Поэтому для управления процессами сварки целесообразно использовать персональный компьютер, который обладает необходимыми вычислительными мощностями и универсальностью, не требует значительных финансовых вложений, поскольку компьютерная техника имеется в каждой исследовательской лаборатории.

Контактная точечная сварка на однофазных машинах переменного тока имеет ряд особенностей, которые определяют требования к управляющим системам:

- ◇ малое (сотые доли секунды) время протекания сварочного тока и в то же время относительно большое (десятые доли секунды) время работы привода сжатия;
- ◇ возможность управления основным параметром сварки — током — только в начале каждого периода в момент введения угла фазной отсечки;
- ◇ наличие большого числа возмущающих факторов, не поддающихся полному контролю;
- ◇ значительные токи во вторичном (десятки тысяч ампер) и первичном (сотни ампер) контурах.

В лаборатории контактной сварки Тольяттинского государственного университета разработан комплекс компьютерного управления контактной сваркой (рис. 7.81), состоящий из персонального компьютера 1, блока цифрового ввода-вывода 2 и блока согласования 3. Комплекс позволяет осуществлять управление контактной сварочной машиной от персонального компьютера по заложенной программе.

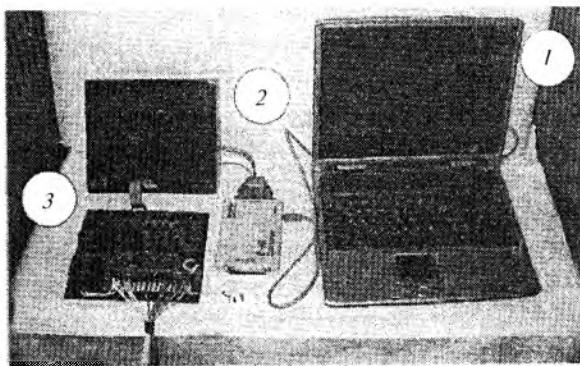


Рис. 7.81. Комплекс компьютерного управления контактной сварочной машиной

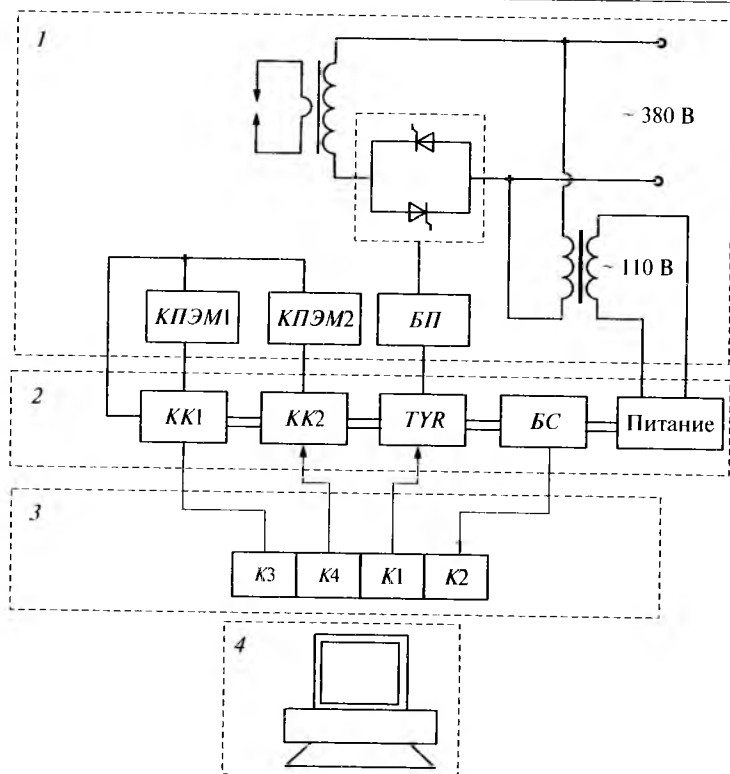
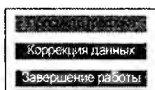


Рис. 7.82. Структурная схема сварочного комплекса с компьютерным управлением: *БП* – блок поджига; *БС* – блок синхронизации; *КК1*, *КК2* – коммутация катушек управления; *К1*–*К4* – каналы ввода-вывода; *КПЭМ1*, *КПЭМ2* – управляющие катушки пневмораспределителей; *ТУР* – формирователь импульсов запуска тириستоров

Схема комплекса (рис. 7.82) включает сварочную машину 1, блоки согласования 2 и цифрового ввода-вывода 3, персональный компьютер 4. Данный комплекс позволяет выполнять сварку по всем видам циклограмм, реализуемых силовой и механической частями контактной машины, осуществлять фазное регулирование сварочного тока, модуляцию сварочного импульса, ступенчатое увеличение сварочного тока для компенсации износа электрода и др. Комплекс может быть изготовлен в исследовательской лаборатории из стандартных узлов без значительных финансовых и трудовых затрат.

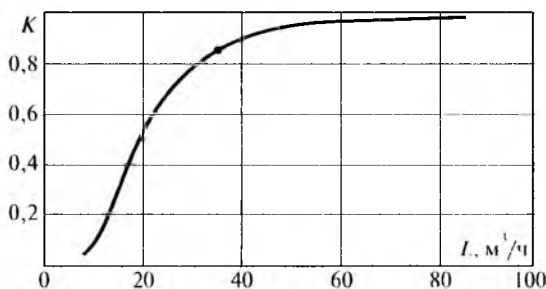
Компьютерное моделирование с успехом применяется и для анализа процессов, сопутствующих сварке. Например, в настоящее время предъявляются жесткие требования к уровню предельно допустимых концентраций (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочего помещения, где выполняется сварка. Компьютерная программа, разработанная на базе соответствующей модели, позволяет выполнять расчет необходимых установок местной вытяжки в районе сварочного поста, обеспечивающих требования по ПДК (рис. 7.83).

Исходные данные:		Коэффициент эффективности действия	Расход воздуха $\text{м}^3/\text{ч}$
Ток сварки, А	315	0,05	8,6
Напряжение дуги, В	28	0,10	10,5
Диаметр отверстия вытяжного патрубка, мм	34	0,15	11,9
Высота расположения центра отверстия, мм	48	0,20	13,2
Угол отклонения патрубка от вертикали, градус	15	0,25	14,3
Коэффициент эффективности действия	0,86	0,30	15,4
		0,35	16,5
		0,40	17,5
		0,45	18,7
		0,50	19,8
		0,55	21,1
		0,60	22,4
		0,65	24,0
		0,70	25,7
		0,75	27,8
		0,80	30,4
		0,85	33,9
		0,86	34,8
		0,90	39,3
		0,95	49,9
		0,99	85,2



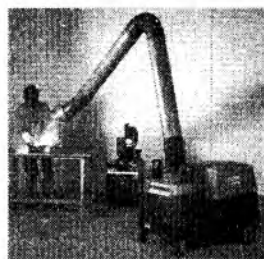
Перемещение: (↑), (↓), (End), (Home), Выбор: (Enter) или Hot Key

а



Просмотр таблицы Коррекция данных Завершение работы

б



в

Рис. 7.83. Вид экрана после ввода исходных данных (а) и график (б) при работе программы расчета малогабаритных вытяжных устройств для рабочего места сварщика (в)

Современные технические и программные средства создают широкие возможности для информационной поддержки,

необходимой при проектировании технологических процессов сварки и родственных технологий.

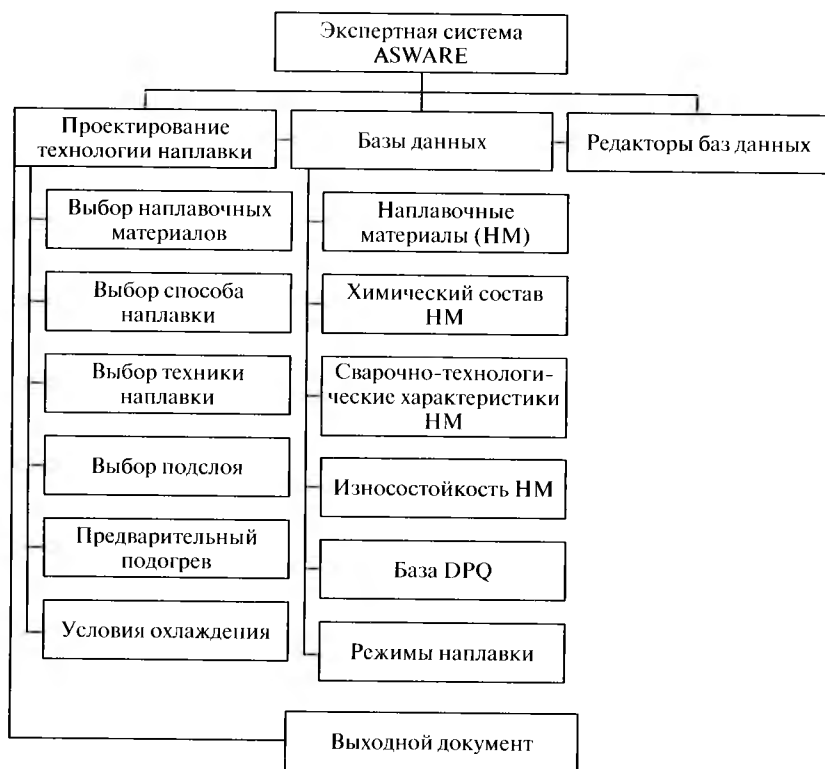


Рис. 7.84. Структура экспертной системы «Наплавка» для компьютерного проектирования технологий механизированной электродуговой наплавки

Например, в ИЭС им. Е.О. Патона разработана экспертная компьютерная система «Наплавка» (рис. 7.84), объединяющая в рамках единой компьютерной системы базы данных и базы знаний и предназначенная для проектирования технологий механизированной электродуговой наплавки деталей машин и механизмов.

Основным структурным элементом системы является блок «Проектирование технологии наплавки», который выполняет функции базы знаний и осуществляет управление базами данных системы. В базе данных «Наплавочные материалы» сосредото-

на информация, необходимая для выбора наплавочных материалов в зависимости от условий работы и видов изнашивания детали. Работа по выбору наплавочных материалов ведется в режиме диалога с пользователем. Завершающим этапом работы экспертной системы является формирование выходного документа (технологической карты), в котором отражаются результаты совместной работы компьютера и пользователя по выбору наплавочных материалов, технологии и техники наплавки (рис. 7.85).

	ДЕТАЛЬ 408 ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ сталь легированная или низколегированная (мартенс 5-7 % Cr) ПОДСЛОЙ НАПЛАВЛЕННЫЙ МАТЕРИАЛ CS-10K17T								
РАЗМЕРЫ ДЕТАЛИ, мм D1 = 500 D2 = 400 L = 600 l = 400 h = 6	ТЕХНОЛОГИЯ НАПЛАВКИ способ наплавки ЭДН (электродом с вольфрамовым сердечником в среде флюса) техника наплавки по датчиковой линии предварительный подогрев 200 - 350 °C охлаждение замедленное род тока постоянный полярность обратная								
? info * Back → Save X Cancel Print	РЕЖИМ НАПЛАВКИ <table border="0"> <tr> <td>Dp = 4 мм</td> <td>h = 30.50 мм</td> </tr> <tr> <td>I = 650-700 А</td> <td>α = 18.25 мм</td> </tr> <tr> <td>U = 24-36 В</td> <td>Sm = 25.00 мм</td> </tr> <tr> <td>V = 15.25 м/сек</td> <td>L = 12.20 мм</td> </tr> </table>	Dp = 4 мм	h = 30.50 мм	I = 650-700 А	α = 18.25 мм	U = 24-36 В	Sm = 25.00 мм	V = 15.25 м/сек	L = 12.20 мм
Dp = 4 мм	h = 30.50 мм								
I = 650-700 А	α = 18.25 мм								
U = 24-36 В	Sm = 25.00 мм								
V = 15.25 м/сек	L = 12.20 мм								

Рис. 7.85. Выходной документ (технологическая карта) компьютерной экспертной системы «Наплавка»

С помощью программного средства «Раскрой листового материала» системы Техтран (рис. 7.86) можно эффективно решать проблемы сокращения сроков раскройки металла, снижения расхода материала за счет оптимального размещения деталей на листе, что в конечном итоге определяет себестоимость продукции. Задача заключается в том, чтобы по заданию на раскрой, состоящему из номенклатуры отобранных деталей и их числа по каждому наименованию, оперативно с учетом складских запасов оптимальным образом разместить детали на листах (рис. 7.87) и получить управляющие программы резки этих деталей. Листы делового отхода, остающиеся после работы, должны быть учтены в базе данных системы для дальнейшего использования.



Р и с. 7.86. Схема работы программы «Раскрой листового материала»

В последние годы были созданы оригинальные модели, алгоритмы и программные *средства автоматизированного конструирования* сборочно-сварочных приспособлений (ССП). Компьютерное проектирование технологических приспособлений и стенов существенно сокращает сроки разработок и улучшает качество документации.

В качестве примера использования компьютерных технологий в проектировании СПП можно привести программную систему ИНСВАР, функционирующую в операционной среде Windows и поддерживаемую графической системой AutoCAD. Формируемая компьютером чертежная документация выводится на принтер либо плоттер. Укрупненная схема построения системы ИНСВАР показана на рис. 7.88.

Блок «Изделие» обеспечивает ввод исходной геометрической информации о деталях. Из блока «Технология» используется информация о технологических узлах конструкции, положении узлов и деталей при сборке-сварке, режимах выполнения сварки. Блок «Техническое задание» предоставляет

возможность инженеру-технологу выразить свои требования к разрабатываемому приспособлению:

- ♦ тип ССП – стационарное, поворотное и др.;
- ♦ тип привода силовых устройств (пневматический, гидравлический и проч.);
- ♦ тип корпуса ССП – плита, рама и т.п.;
- ♦ требования к доступности сварных швов – хорошая, удовлетворительная;
- ♦ необходимость анализа напряженно-деформированного состояния сварных сборочных единиц в ССП.

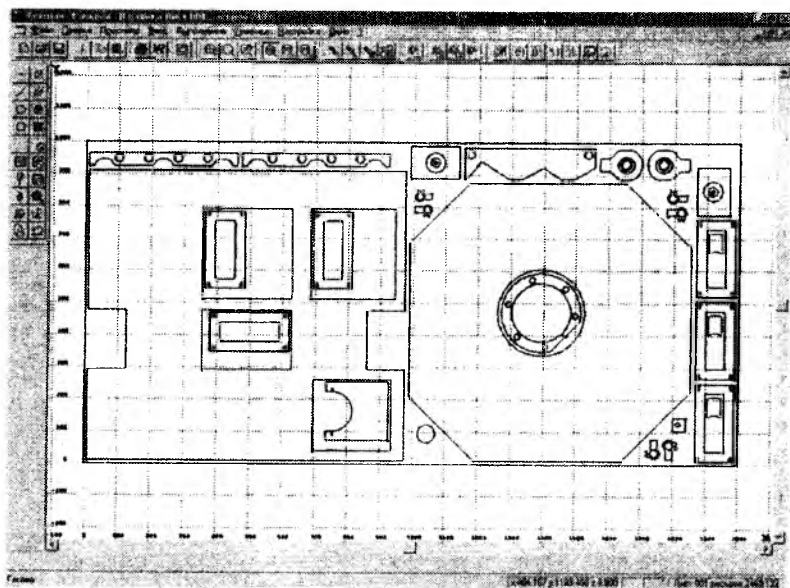


Рис. 7.87. Результат размещения деталей на листе с помощью программы «Раскрой листового материала»

В блок «Среда функционирования приспособлений» вводится информация о типах используемых кантователей, вращателей и других устройствах, с которыми стыкуется разрабатываемое приспособление.

На рис. 7.89 показан пример конструкции ССП, спроектированной системой ИНСВАР.



Рис. 7.88. Схема построения системы ИНСВАР для автоматизированного проектирования сборочно-сварочной технологической оснастки

Компьютеризация современных методов исследований и контроля качества сварных соединений помимо трех названных направлений использования компьютерных технологий в сварке (CAE, CAM и CAD) приобретает все возрастающее значение. Одним из таких методов является металлография, широко используемая для периодического контроля качества сварных соединений, а также исследования и выявления причин разрушения сварных металлоконструкций. Для данных целей разработаны специальные компьютерные системы анализа изображений, например отечественная система Thixomet.

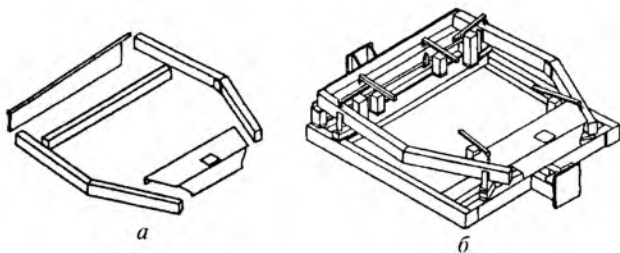


Рис. 7.89. Пример конструкции ССП, сформированной программной системой ИНСВАР:

а — элементы конструкции, подлежащие сварке; б — ССП в сборе с деталями, подготовленными к сварке

Все оборудование системы компактно размещается на стандартном столе микроскопа (рис. 7.90). Высокочувствительные видеокамеры установлены вместо окуляров в микроскоп и микротвердомер. Еще одна видеокамера служит для съемки внешнего вида детали и макросъемки.

Ввод изображения с видеокамер в компьютер производится с помощью фреймграббера — специального устройства захвата кадров. Результаты контроля распечатываются на принтере, что позволяет избежать трудоемких операций «мокрой» обработки фотоматериалов. Пример изображения, получаемого в системе Thixomet, дан на рис. 7.91. С помощью программы Thixomet можно производить оценку параметров микроструктуры, выполнять автоматизированный контроль металлургических дефектов. В программе реализован метод 3D-реконструкции, что позволяет восстанавливать объемное изображение структуры или дефекта и оценивать его параметры. Это открывает возможность определять механизм образования дефектов (например, квалифицировать трещины как металлургические, усталостные, коррозионные и др.), что важно при анализе причин разрушения.



Рис. 7.90. Компьютерная система анализа изображений Thixomet

Рентгеновский и гаммаграфический методы принадлежат к числу важнейших методов контроля ответственных сварных соединений. Обычно дефектоскопист визуально анализирует снимки и идентифицирует обнаруженные дефекты и качество расшифровки снимков носит субъективный характер, так как в

той или иной мере сказывается человеческий фактор — уровень подготовки дефектоскописта, его самочувствие (усталость и проч.). Один из перспективных способов решения данной проблемы — реализация компьютерных технологий в этой области. На основании накопленного опыта разработок компьютерной расшифровки рентгеновских и гаммаграфических снимков предложена следующая технология распознавания и анализа дефектов: 1) ввод изображения снимка и сопроводительной информации в компьютер; 2) создание блока программ предварительного анализа изображения и его пригодности к дальнейшей компьютерной обработке; 3) создание блока программ поиска и выделения контуров дефектов, идентификация их типов и определение их геометрических характеристик; 4) создание расчетно-аналитического блока для получения заключения по дефектности сварного соединения; 5) статистическая обработка получаемых результатов; 6) создание вспомогательных сервисных функций.

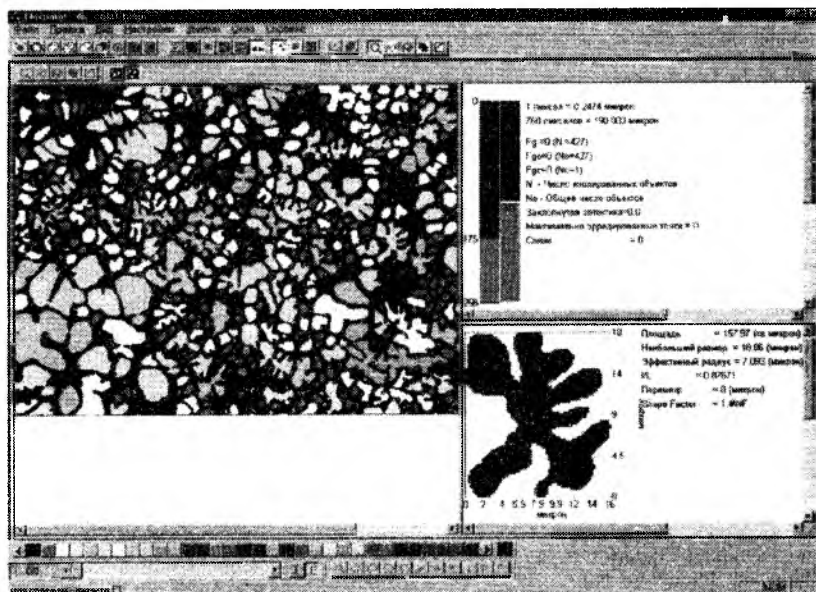


Рис. 7.91. Изображение микроструктуры в рабочем окне программы Thixomet

Сравнение предварительных результатов независимого тестирования компьютерной системы с результатами оценки снимков дефектоскопистами показало, что система переоценивает размеры дефектов примерно на 15–20 %. Человек недооценивает размер на 10–15 %, особенно на дефектах малой площади.

Недооценка может привести к серьезным последствиям, а «подправить» специалиста нельзя. Ясно, что использование компьютерных технологий должно помочь уменьшить влияние человеческого фактора при расшифровке рентгеновских и гаммаграфических снимков.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоят цели и задачи проектирования сварных конструкций?
2. Как рассчитать элемент сварной конструкции, работающий на растяжение?
3. Какие виды работ включает в себя процесс изготовления сварных конструкций?
4. Какие процессы (операции) используются при изготовлении заготовок сварных конструкций?
5. Как выполняется подготовка кромок соединяемых элементов под сварку?
6. С какой целью используют приспособления при сборке соединяемых заготовок под сварку?
7. С какой целью и в чем заключается автоматизация и механизация процесса сварки и вспомогательных работ при сварке?
8. Какие задачи позволяет решить применение роботов в сварочном производстве?
9. Какими способами можно устранить деформации и снизить остаточные напряжения при сварке?
10. От каких факторов зависит качество сварных изделий?
11. Какие дефекты характерны для сварных соединений?
12. Назовите основные методы неразрушающего контроля сварных соединений.

13. Какие дефекты сварных соединений можно обнаружить при внешнем осмотре?
14. Как контролируют форму и размеры сварных швов?
15. Какие характеристики сварных соединений определяются механическими испытаниями?
16. Что позволяет определить металлографический и фрактографический анализ зон соединения и поверхностей разрушения сварных конструкций?

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ. СВАРКА В XXI в.

Тенденции развития технологии соединения материалов. При изготовлении технической продукции отчетливо просматриваются шесть тенденций, а именно: расширение номенклатуры материалов при конструировании изделий, разработка новых материалов, автоматизация, моделирование, ремонт и переработка (утилизация) продукции.

1. При разработке новой и дальнейшей разработке существующей технической продукции больше внимания уделяется оптимизации использования материала, при котором также учитываются локальные напряжения. Даже отдельные детали и узлы во все большей степени составляются из различных материалов, например прецизионные заготовки вырезают из различных стальных листов разной толщины с разным качеством поверхности, или компонентов с локальными антикоррозионными или износостойкими покрытиями. Более того, сочетание стали с легкими металлами или пластмассами используется еще чаще при строительстве легких конструкций, а значение сплавов на основе никеля при сооружении электростанций и авиадвигателей продолжает расти. При этом к соединениям предъявляются все обычные требования по прочности, вязкости, коррозионной стойкости и т.д. Например, в автомобилестроении используются такие материалы, как сталь, алюминий, магний и пластмассы. В кузовах современных автомобилей без покраски применяются следующие соединения: 90 м конструкционных клеевых швов; 1400 штампованных заклепок; 280 заклепочных соединений с расплющенной головкой; 190 глухих заклепок; 100 точечных швов, полученных сваркой сопротивлением.
2. Техническая продукция изготавливается из металлов (в частности, черных металлов; сплавов, состоящих из алюминия, магния или титана для легких металлических конструкций, никелевых сплавов для жаростойких или коррозионно-стойких изделий, меди и ее сплавов для электрических компонентов и

теплообменников и т.д.), природных материалов и пластмасс. Для этих материалов необходимо разрабатывать соответствующие сварочные процессы и присадочные материалы, обеспечивая работоспособность и длительную прочность изделий. При проектировании заводов и электростанций к материалам и технологиям предъявляются еще более жесткие требования в отношении более высоких температур и коррозионной стойкости, а также прочности.

Современные композитные материалы и соединения материалов, например сочетание текстильных волокон с бетоном или волокон или наночастиц с пластмассами (среди других материалов), свидетельствуют о новых путях развития материалов и их применения. Интегрирование таких материалов делает необходимой разработку совершенно новых технологий получения соединений для того, чтобы их преимущества не были утрачены при получении соединений.

Поэтому технологии соединения в будущем станут стержневыми элементами для обеспечения быстрого, бесперебойного и надежного производства. Технологии соединения интегрированы в цепочку процессов изготовления и в дальнейшем дадут фундаментальный вклад в стоимость, добавленную производственным сектором. Технология получения соединений будет играть исключительно важную роль на всех этапах существования продукции — при конструировании, разработке, изготовлении, использовании, техобслуживании и ремонте продукта, а также при его переработке и утилизации. Поэтому будут приняты последовательные междисциплинарные подходы к исследованиям, разработкам, изготовлению и применению в этой сфере.

3. Одним из важных аспектов развития соединений материалов является повышение требований к механизации и автоматизации операции получения соединений, обеспечивающих минимизацию стоимости изготовления. Это относится не только к традиционным процессам сварки (дуговая сварка, низко- и высокотемпературная пайка), но и к вновь разработанным процессам (гибридные процессы, сварка трением с перемешиванием, лазерная и электронно-лучевая сварка). Соответствующие методы все чаще используют в промышленно развитых странах.

Вследствие роста оплаты труда, нехватки квалифицированных сварщиков и снижения цен на работы эта тенденция будет развиваться, так как работы скоро будут внедрены в мелкосерийное и единичное производство благодаря расширению возможностей моделирования процесса.

В связи с этим, а также по экономическим соображениям моделирование процессов и свойств станет ключевым фактором для применения и дальнейшей разработки процессов соединения и материалов. Те процессы и материалы, которые не поддаются надежному моделированию, в будущем использоваться не будут. Моделируемые процессы соединения позволяют проводить виртуальные испытания и оптимизацию процессов соединения даже до начала производства, позволяют выполнять планирование и реализацию концепций обеспечения качества до выполнения процессов получения соединений, облегчают запуск, эксплуатацию и ремонт. На ранней стадии они также позволяют получить информацию для проведения необходимого обучения персонала для изготовления, техобслуживания и ремонта. Целью должно быть создание универсальной концепции для моделирования всей технологической цепочки на основе элементов, состоящих из моделирования процесса, конструкции и материала.

4. В течение последних нескольких лет возможности моделирования напряжений в деталях и их изготовления постоянно расширялись, поскольку постоянно увеличиваются мощности компьютеров, совершенствуется математическое обеспечение, улучшаются свойства материалов.
5. Недостатки современной технологии соединения материалов связаны с тем, что учитывается возможность ремонта дефектной детали на самом раннем этапе. Такие детали не следует сразу отправлять на металлолом. При наличии соответствующих технологий соединения их можно снова сделать пригодными к эксплуатации, что выгодно с точки зрения как экономики, так и экологии. Поэтому в последнее время большое внимание уделялось понятиям ремонта и технического обслуживания, особенно для изделий с соединениями при изготовлении дорожных транспортных средств. Концепции ремонта должны быть неотъемлемой частью процесса разработки продукции и учитывать расширяющееся применение высоко-

прочных сталей, сплавов легких металлов, пластмасс и заготовок специального раскроя, а также применения процессов лазерной сварки, склеивания и механического соединения. Это важно, поскольку процессы соединения, применяемые на производстве, могут оказать непосредственное влияние на возможную стоимость ремонта транспортных средств. Более того, стоимость страхования третьих сторон и собственных транспортных средств зависит не только от частоты аварий, но и от стоимости ремонта. Процессы получения соединений, которые обеспечивают быстрое изготовление, но приводят к большим расходам, в случаях ремонта могут привести к обратным результатам. Методы модульного строительства, которые пригодны для ремонта, применяются особенно широко в случае конструирования транспортных средств.

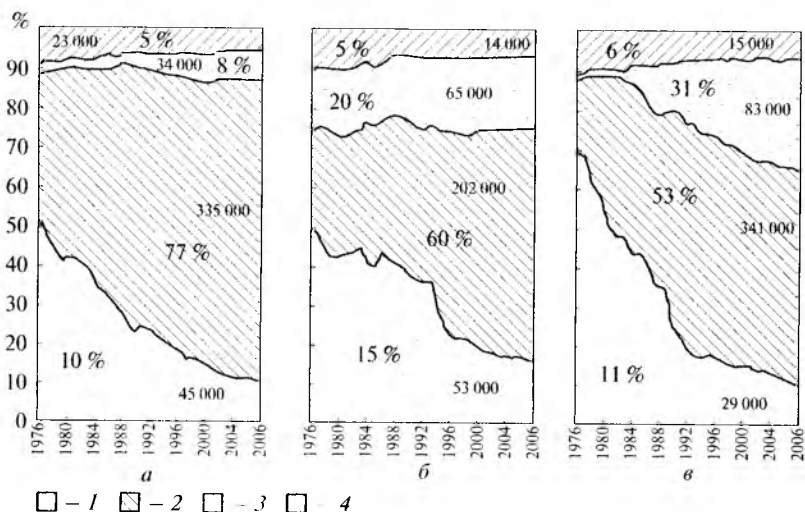


Рис. 31. Соотношение применения дуговых способов сварки по регионам:

а – Западная Европа (437 000 т); б – США (335 000 т); в – Япония (268 000 т); 1 – ручная дуговая сварка плавящимся электродом; 2 – МИГ/МАГ; 3 – СТП; 4 – АДСФ

6. Часто бывает экономически выгоднее заменить дефектную или поврежденную деталь, чем ее отремонтировать, но такой подход противоречит всем стратегиям сохранения ресурсов. Переосмысление стратегии ремонта начнется уже в ближайшем будущем. Желание людей защитить окружающую среду

приводит к особому взгляду на технологию, это относится и к технологии соединения. В качестве примеров, возникающих в результате такого требования, можно привести следующие: экономичное использование первичной и вторичной энергии, сохранение сырьевых материалов, предотвращение образования или устранение или хранение отходов, выбор и переработка повторно используемых материалов, а также процессы переработки соединяемых компонентов.

Технологии получения соединений: новейшие разработки. *Дуговая сварка* металлическим электродом является одним из старейших процессов сварки наряду с газовой. Сварка электродом впервые была применена в начале XX в., однако и сегодня этот процесс по-прежнему является наиболее широко применяемым. Присадочные материалы имеются почти для всех свариваемых металлических материалов, а для новых материалов они могут быть разработаны довольно быстро. Более того, этот процесс выполняется в разных пространственных положениях, мало зависит от условий окружающей среды, поэтому незаменим для сборки и ремонта. Недостатки связаны со сложностью механизации процесса по сравнению с другими процессами дуговой сварки, а также с экологическими проблемами, создаваемыми сварочными аэрозолями. Следовательно, необходимы индивидуальные средства защиты для сварщика. При серийном и массовом производстве этот процесс все больше заменяется более эффективными и экологичными.

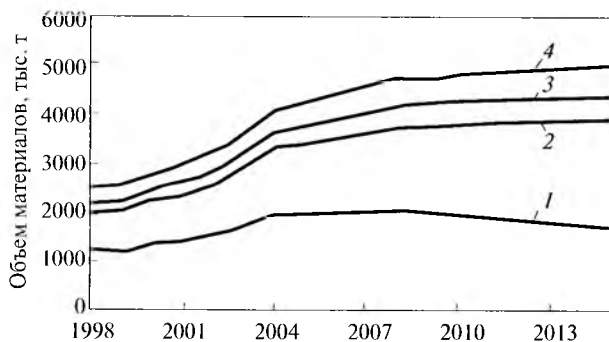


Рис. 32. Соотношение объемов использования сварочных материалов в 1998–2013 гг.:

1 – электроды;
2 – сплошная проволока; 3 – проволока для сварки дуговой под флюсом;
4 – порошковая проволока

По-прежнему характерным показателем интенсивности применения способов сварки является количество расходных присадочных материалов (рис. 31, 32). В последние годы во всех промышленных странах доля сварки ручными электродами постоянно снижалась. Однако используется все больше способов, при которых применяется мало присадочных материалов или они не используются вообще.

Кроме того, широко применяются такие процессы дуговой сварки металлическим электродом, как дуговая сварка плавящимся электродом в защитных газах, дуговая сварка под флюсом, дуговая сварка вольфрамовым электродом в инертных газах и плазменная сварка.

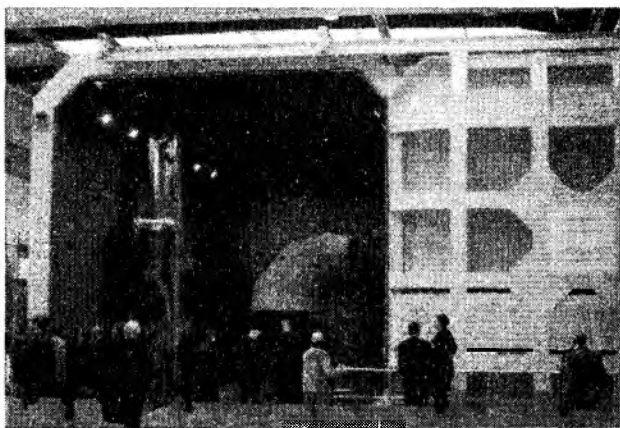


Рис. 33. Вакуумная камера для электронно-лучевой сварки крупных изделий

В последнее время внимание специалистов привлекли разработки, связанные с контролируемым энерговыделением, — «холодная дуга» или перенос холодного металла. Эти процессы обеспечивают контроль за переносом металла при сварке короткой дугой за счет снижения тока на этапе короткого замыкания или путем отведения проволоки во время переноса металла или сразу после него, что позволяет выполнять не только сварку с очень низким разбрызгиванием, и сварку материалов, чувствительных к перегреву, — высокопрочных сталей или сталей с поверхностными покрытиями.

Защитные газы для дуговой сварки постоянно рафинируются с целью снижения разбрызгивания, расходов, а также уменьшения загрязнения окружающей среды.

Лазерная и электронно-лучевая сварка. За последние 10 лет лучевые процессы получили сильное развитие и используются во многих областях машиностроения в условиях полной механизации или автоматизации.

Электронно-лучевая сварка как наиболее освоенный из этих двух процессов находит все более широкое применение благодаря прежде всего усовершенствованию технологии приборостроения. К ее преимуществам относятся очень высокая плотность энергии и соответственно низкое тепловложение даже в случае швов самой большой толщины — до 250 мм и более. Большие вакуумные камеры (до 630 м³) позволяют выполнять сварку изделий значительных габаритов (рис. 33). Благодаря расщеплению луча можно выполнять несколько швов на одном узле одновременно. В промышленности находят все более широкое применение вневакуумные электронно-лучевые методы.

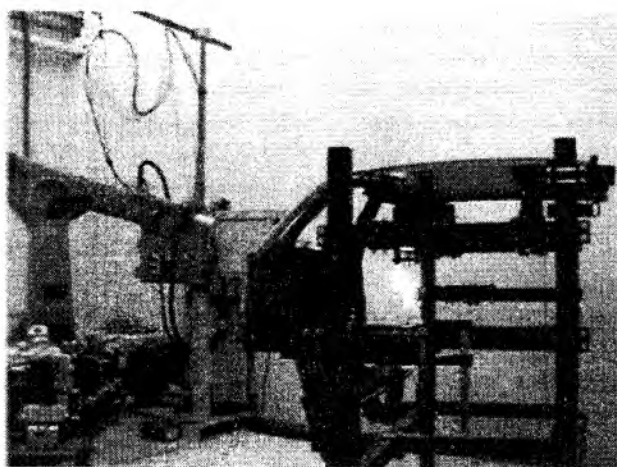


Рис. 34. Лазерная сварка с дистанционным управлением

Существенное преимущество лазерной сварки в том, что ее можно использовать вне вакуума, но только в диапазоне толщин материалов до 20 мм. Этот процесс целесообразно исполь-

зовать для прецизионного листового раскроя сталей и других материалов. Еще одним преимуществом лазерной сварки, как и электронно-лучевой, является низкое тепловложение вследствие высокой плотности энергии. При наличии дистанционного управления можно выполнять лазерную сварку и резку на большом расстоянии между источником луча и металлом — до 500 мм, что в перспективе будет широко применяться в автомобилестроении (рис. 34).

Лазерная сварка также используется при обработке пластмасс, но для подлежащей обработки пластмассы должны быть установлены требования к светопоглощению.

Сварка трением и сопротивлением. Новые разработки сварки трением в области технологии машин позволяют использовать боковое перемещение свариваемых деталей относительно друг друга, поэтому его можно использовать для соединения больших сечений, не симметричных при вращении. Одним из особых вариантов является сварка трением с перемешиванием (СТП), которая, однако, на практике используется пока только для алюминия и его сплавов. Их применению для других материалов (в частности, для стали) препятствует относительно низкая стойкость вращающихся инструментов. Разработки выполняются во многих странах мира и охватывают различные материалы, толщины и размеры (табл. 31).

Основным преимуществом этих процессов является то, что сварка выполняется при температуре ниже температуры плавления, что обуславливает незначительные структурные изменения в соединяемых материалах. Однако большие усилия, которые необходимо прикладывать к изделиям, требуют применения мощной оснастки. Сварка трением с перемешиванием используется при строительстве рельсового транспорта и в аэрокосмической промышленности, для герметичной вварки крышек в детали гидравлических управляющих устройств.

Гибридные процессы сварки. Сочетание дуговой сварки металлическим электродом с лазерной сваркой было особенно быстро внедрено в практику судо- и автомобилестроения.

Сочетание обоих процессов приводит к идеальному использованию преимуществ процесса — высокой плотности энергии, глубокого проплавления и высокой скорости сварки за счет лазера, а также хорошей способности заполнения зазо-

ра и исключения несплавлений за счет дуги. При сочетании обоих процессов можно сваривать металл большей толщины, чем при каждом процессе в отдельности.

Таблица 31. Сварка трением с перемешиванием различных материалов (*P* – область современного применения СТП; *R* – область современных исследований в области СТП; *D* – область, где СТП была продемонстрирована)

Материал	Толщина образца, мм						
	До 1	1–4	4–8	8–12	До 25	До 50	До 75
Чистый алюминий		D	D				
Al – серия 2xxx		R	R	R	R	R	
Al – серия 5xxx	R	P	P	P	P	R	R
Al – серия 6xxx	R	P	P	P	P	R	R
Al – серия 7xxx		P	P	P	R	R	
Al – отливки		R	R	R	R		
Mg – серия AM		R	R	D			
Mg – серия AZ		R	R	D			
Чистая медь	D	D	R	R	D	R	
Cu – латуни		D	D	D			
Чистый титан		D	R	D			
Ti – α – β сплав		R	R	D			
Чистый никель		R	R				
Стали мягкие		D	D				
Стали C–Mn		R	R	R	D		
Стали нержавеющие		R	R	R			
Pb		D	D				
Zn	D	D					

В последние годы все больше внимания уделяется родственным процессам соединения из-за необходимости соединения различных материалов, неудовлетворительно сваривающихся традиционными видами сварки, и постоянно растущей чувствительности материалов к тепловложению при сварке.

Высоко- и низкотемпературная пайка — соединение металлических материалов ниже температуры солидус с использованием припоя. Низкотемпературная пайка используется для соединения деталей электроники, электрических кабелей и проводников, труб из медных и цинковых или оцинкованных листов, а также в ювелирной промышленности. Температура низкотемпературной пайки должна быть ниже 350 °С с тем, чтобы использовать припой с низкой температурой плавления. Из-за токсичного эффекта припой, содержащие свинец, как правило, используются весьма редко. Хотя разработаны припой-заменители с подобными свойствами и без токсичных побочных эффектов, их недостаточно для всех случаев применения. Поэтому данные разработки продолжаются.

Высокопрочные соединения металлов и керамики изготавливаются путем пайки и высокотемпературной пайки с использованием припоев для высокотемпературной пайки, изготовленных из различных металлов и металлических сплавов, в зависимости от паяемых материалов и условий эксплуатации. В последнее время приобрела более широкое распространение и используется в автомобильной промышленности для соединения оцинкованных листов при изготовлении кузовов дуговая пайка с использованием упомянутых выше технологий «холодной» дуги. Можно предположить, что дуговая пайка будет использоваться и в других отраслях.

Склеивание используется все шире как метод «холодного» соединения пластмасс и металлов (например, вклеивание окон в автомобилях) благодаря ряду серьезных преимуществ особенно для соединения теплочувствительных материалов. Сегодня имеются адгезивные материалы, позволяющие выполнять соединения различных материалов, которые могут выдерживать значительные нагрузки в течение длительного времени и в довольно широких диапазонах температур. Однако их использование при более низких или высоких температурах (например, ниже –50 °С или выше +180 °С) по-прежнему проблематично.

Механическое соединение или соединение с формовкой материалов, особенно металлов, которое известно, например, как заклепывание, или клепка-штамповка, является еще одним процессом «холодного» соединения. Применение данного

способа соединения предпочтительно для сталей, если это соединение подвержено воздействию низких напряжений, главным образом статических. В таком случае покрытия на поверхности остаются практически неповрежденными и коррозионная защита сохраняется. Этот способ находит применение при изготовлении кухонной утвари и иной подобной продукции, а также в автомобильной промышленности и технологии вентиляционных устройств.

Гибридные процессы получения соединений — сочетания смежных технологий друг с другом и с процессами сварки. Так, сочетание точечной сварки сопротивлением со склеиванием сегодня широко распространено в автомобильной промышленности, объединяя высокую надежность с повышенной жесткостью корпуса, улучшенной коррозионной защитой при хороших экономических показателях.

Сочетание склеивания с механическими процессами соединения существенно повышает прочности на смятие соединений по сравнению только с механическим соединением. Совсем недавно соединение стали с алюминием было серьезной проблемой из-за широкого применения алюминиевых сплавов в автомобилестроении с целью снижения массы автомобилей. Целесообразными решениями являются соединение на винтах, а также механическое соединение и склеивание. Особенно перспективно соединение двух материалов путем сочетания сварки (со стороны алюминия) и пайки (со стороны стали). Это можно выполнить с помощью электрической дуги, обеспечивая необходимую надежность.

Микросоединения стали постоянным элементом электронных систем, их размеры уменьшаются, а функциональное содержание возрастает. Самым ярким примером таких разработок являются мобильные телефоны. Всего несколько лет назад это были громоздкие устройства с длинной торчащей антенной. Такие разработки стали возможными во многом благодаря постоянному совершенствованию технологии микросоединений. Миниатюризация полупроводников и пассивных компонентов заставила технологов в области получения соединений разрабатывать соединения еще меньших размеров. Эта тенденция не ослабевает.

Экономическая эффективность технологии неразъемного соединения. В технологической цепочке изготовления продукции все большее значение придается экономичности технологии соединения.

Технологии сварки в современной промышленности Японии

Сварочные технологии в судостроении. На рис. П1.1 показаны первый в мире сверхкрупный танкер для перевозки сырой нефти «Idemitsu», построенный в 1966 г., а также новый танкер на судовой верфи, построенный недавно с применением последних технических достижений. При строительстве «Idemitsu» впервые использовали автоматическую одностороннюю сварку для стали с временным сопротивлением 490 МПа. Современные танкеры для перевозки нефти представляют собой конструкции с двойным корпусом. Большие панели обшивки днища получают стыковой сваркой листов, соединяемых угловыми швами с продольными ребрами жесткости. Затем сварные панели собирают сборочными элементами для получения блоков обшивки днища с двойным корпусом. Данная конструкция оказалась очень перспективной для танкеров, поскольку исключает разлив нефти в случае, если судно сядет на мель. Это обусловило увеличение числа заказов на танкеры с двойным корпусом. Однако у таких танкеров значительно увеличилась масса корпусного блока, а также число соединений сложной формы, которые должны выполняться в доке. Вследствие усложнения конструкций снизилась эффективность производства.

Сварка «в лодочку», которая представляет собой самый простой способ автоматической дуговой сварки металлическим покрытым электродом, была разработана в Японии во время Второй мировой войны. Этот способ сварки позволяет одному оператору-сварщику одновременно управлять несколькими машинами для сварки «в лодочку», что значительно повышает эффективность производства. Его все еще используют на некоторых судовой верфях для соединения сборочных узлов, но в основном его вытеснили другие автоматические процессы сварки. В судостроении наиболее широко применяется сварка в углекислом газе, которую выполняют с помощью различных автоматов, установленных на каретки упрощенной конструкции.

Автоматическая сварка применяется для соединения блоков в параллельной части корпуса. Машины для автоматической сварки угловых швов в углекислом газе, оснащенные несколькими горелками, часто используются для сварки листов обшивки корпуса и продольных ребер жесткости. На многих судостроительных заводах для скоростной стыковой сварки больших листов обшивки корпуса применяют одностороннюю многоточечную сварку под флюсом с медной подкладкой. Полуавтоматическая или роботизированная сварка служит для соединения поперечных и продольных элементов в сборочных процессах.

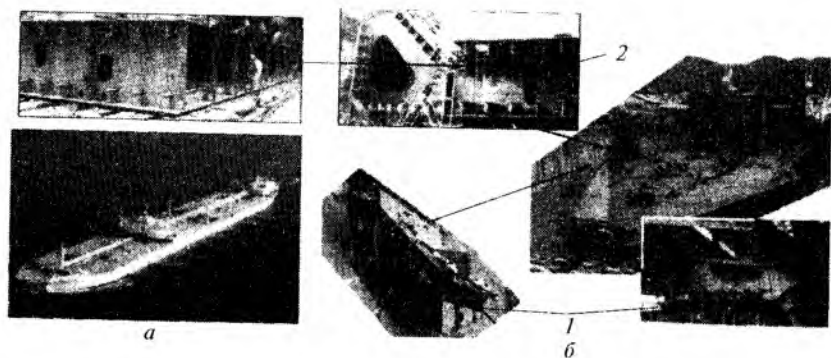


Рис. П1.1. Танкеры для перевозки сырой нефти:

а — «Idemitsu» (Япония, 1966); *б* — с двойным корпусом; 1 — блоки в искривленной части корпуса; 2 — блоки в параллельной части корпуса

После установки блоков двойные листы наружной обшивки днища и листы бортовой обшивки соединяют сваркой блок с блоком. При этом сваривают все секции блоков, включая продольные ребра жесткости. Машины для полуавтоматической сварки в углекислом газе и для автоматической сварки устанавливают на автоматические тележки упрощенной конструкции, а для соединения блоков часто используют сварку под флюсом на асбестовой флюсовой подушке. Стыковую сварку листов бортовой обшивки выполняют автоматической газозащитной сваркой и автоматической сваркой в углекислом газе. Для осуществления стыковой сварки продольных ребер жесткости применяются упрощенные роботы портативного типа.

В судостроении изменились классы сталей — от низкоуглеродистых до высокопрочных, их предел текучести повысился с

320 до 360 и с 360 до 400 МПа. В 1980-х гг. была разработана и теперь широко используется в судостроении сталь ТМСП, полученная с контролем термомеханических характеристик. Благодаря применению такой стали достигнуто значительное повышение эффективности производства в судостроении. Измельчение зерна способствует одновременному повышению показателей прочности и вязкости стали. Добавка легирующих элементов в меньшей степени влияет на уровень прочности стали, вызывая снижение углеродного эквивалента. Сталь ТМСП является сталью контролируемой прокатки и ускоренного охлаждения.

Сталь класса E по стандарту NK
KCV, Дж/м²

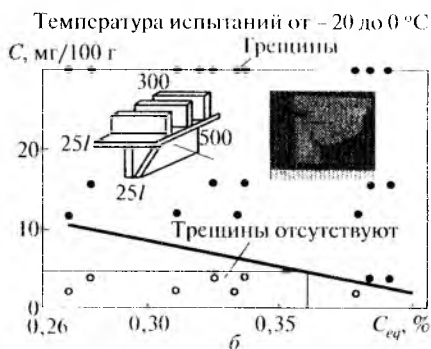
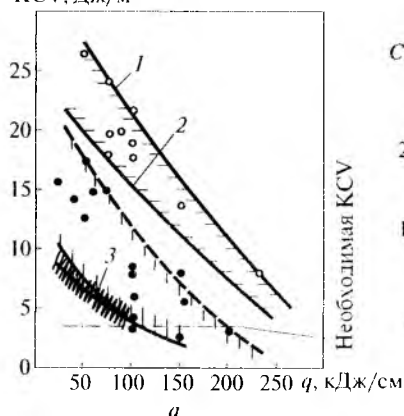


Рис. П1.2. Применение стали ТМСП при высокоэффективной сварке с высоким тепловложением (а) и предотвращение образования холодных трещин при сварке угловых швов без предварительного нагрева (б):

1, 2 — сталь ТМСП с обработкой для получения соответственно высокой и невысокой стойкости к тепловложению q ; 3 — обычная (нормализованная) сталь; KCV — ударная вязкость по Шарпи на линии сплавления и в ЗТВ при -20°C ; C — концентрация диффузионно-подвижного водорода в металле шва по стандарту JIS (глицериновый метод); C — углеродный эквивалент по стандарту МИС

На рис. П1.2, а представлена зависимость между тепловложением при сварке и ударной вязкостью по Шарпи на линии сплавления и в зоне термического влияния (ЗТВ) при сварке с высоким тепловложением стальных листов для корпусных конструкций. Значения тепловложения (или погонной энергии) в судостроении ограничены (10 кДж/мм) для обычной

стали, включая нормализованную. Однако применение стали ТМСП и стали, стойкой к высокому тепловложению, позволило внедрить процессы сварки, для которых характерно сверхвысокое тепловложение, такие, как односторонняя сварка под флюсом, газозлектрическая сварка и электрошлаковая сварка.

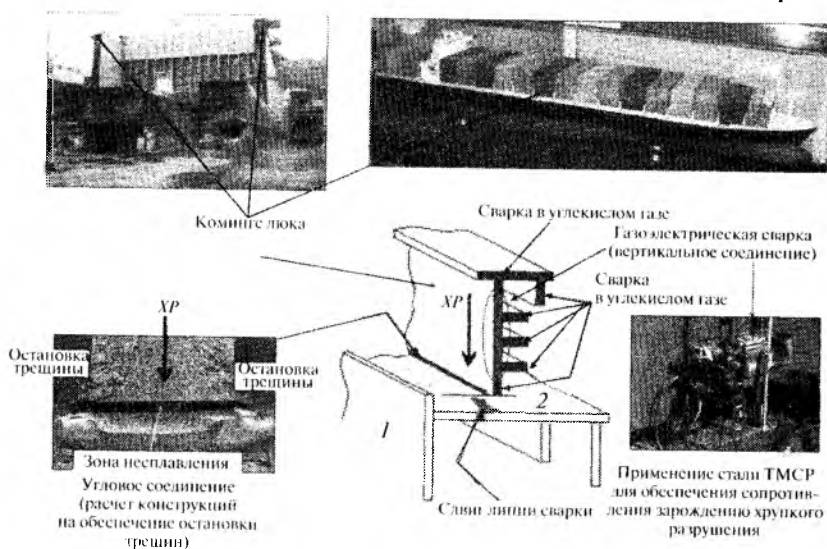


Рис. П1.3. Конструкция контейнеровоза и концепция обеспечения безопасности сварных соединений на комингах люка на основе расчета сопротивления хрупкому разрушению ($ХР$):

1 -- боковая обшивка; 2 -- лист палубного пастила

На рис. П1.3, б показано влияние углеродного эквивалента стали C и концентрации C диффузионно-подвижного водорода в металле шва при угловой сварке в потолочном положении на появление трещин. Для предотвращения образования холодных трещин при выполнении угловых швов в потолочном положении на обычной стали осуществляют предварительный нагрев. В настоящее время при сварке без предварительного нагрева можно использовать сталь с углеродным эквивалентом не выше 0,36 % при условии применения электродов с низким содержанием водорода.

В недалеком будущем для перевозки грузов морским путем планируется внедрять контейнеровозы, способные перевозить

более тысячи контейнеров. В этих кораблях толщина листов комингсов из стали с пределом текучести 390 МПа составляет 80 мм. С точки зрения производительности для этого материала желательно использовать газоэлектрическую сварку с высоким тепловложением. Однако такой процесс сварки способствует снижению вязкости металла шва и ЗТВ. В связи с этим актуальной является проблема обеспечения стойкости против хрупкого разрушения. Именно сталь ТМСР, имеющая высокую ударную вязкость, характеризуется стойкостью к зарождению хрупкого разрушения. Но по принципу двойной целостности используемая сталь должна отличаться способностью к остановке трещины в случае ее зарождения и распространения.

При сварке с полным проплавлением листов палубного настила из обычной стали и продольных комингсов люка трещины могут распространяться в шве и проходить через листы. Для исключения такой ситуации на одном судостроительном заводе используют листы палубного настила из материала со сверхвысокой способностью к остановке трещин, а на другом судостроительном заводе считают целесообразным применение угловых швов вместо стыковых с полным проплавлением, поскольку в швах на продольных комингсах люка и листах палубного настила возникают только напряжения сдвига и это обеспечивает остановку в них трещин. Эта концепция называется «расчет конструкций на обеспечение остановки трещин». При использовании швов с частичным проплавлением и соответствующей формой разделки распространяющаяся в листе палубного настила трещина в конце концов останавливается, даже если он выполнен из обычной стали.

Технологии сварки мостов. Мост Чолкинес в США — первый мост, построенный в 1958 г. с помощью сварки из высокопрочной стали с временным сопротивлением на растяжение 780 МПа (марка НТ780). Такая сталь изначально была разработана для верхней палубы авианосца «York Town». Эту сталь импортировали в Японию, где из нее изготовили сферический резервуар для хранения газа.

Для строительства мостов в Японии сталь НТ780 начали применять в 1970-х гг. Ее использовали для строительства моста Минато (1974), моста Сето (1988), моста Акаси-кайкио, самого длинного подвесного моста в мире, который начали стро-

ить в 1974 г. с применением стали НТ780; строительство завершилось в 1998 г.

Мост Акаси-кайкио выполнен из жестких решетчатых ферм толщиной 30 мм. Вначале температура предварительного нагрева стали НТ780 составляла 100 °С. Однако показатель *С* и показатель химического состава склонной к образованию трещин в шве стали НТ780 год от года снижались. Поэтому необходимая температура предварительного нагрева стали НТ780 с толщиной листа 30 мм была снижена до 50 °С. Это способствует снижению до минимума деформации свариваемых элементов и соответственно сокращает время строительства мостов.

Мост Сето — единственный железнодорожный мост, построенный из стали НТ780. При его строительстве произвели расчет на усталостную прочность, основанный на результатах нескольких испытаний. Но проблемы повышения усталостной прочности высокопрочных сталей, в частности стали НТ780, еще предстоит решить.

При строительстве мостов используются установки для угловой сварки несколькими горелками, а для автоматической угловой сварки — установленные на каретках упрощенной конструкции, подобные применяемым в судостроении. В последнее время в строительстве мостов преобладает концепция рационального проектирования. На рис. П1.4 показаны конструкции мостов, созданные на основе данной концепции, а также выполнение сварки в полевых условиях. В конструкции с плоскими фермами (рис. П1.4, *а*) число основных ферм изменилось с двух полос на четыре основные фермы, в традиционной конструкции моста — до трех полос на три основные фермы.

Мост, построенный на основе данной концепции, имеет минимальное число ферм. Балка коробчатого сечения опирается на две основные фермы (рис. П1.4, *б*) с длиной пролета 100 м. Эта рационализация в проектировании мостов подкреплена хронологическим изменением (хронология — изучение размещения элементов в пространстве) относительных трудовых затрат и стоимости стали. До 1980-х гг. трудовые затраты были невелики по сравнению со стоимостью стали. Так была создана комплексная конструкция с целевым изменением ширины и

толщины полок для минимизации использования материала и достижения наиболее рационального перехода между решетчатыми фермами. При этом для соединения ферм сваривали дополнительные элементы, что привело к увеличению объема сварочных работ. В результате трудовые затраты возросли. Были спроектированы простые сварные конструкции с тем, чтобы сократить число сварочных операций, хотя это привело к повышению расхода стали. Толщина полок фермы увеличилась до 100 мм, и стало невозможно использовать способ соединения ферм жесткости фрикционным зажимом с болтами высокого натяжения. Вследствие этого стало неизбежным применение сварки. На рис. П1.4, б показана сварка толстых мостовых ферм в полевых условиях. Использование для строительства моста толстолистовой стали ТМСП с временным сопротивлением 590 МПа позволило провести сварку без предварительного нагрева даже при толщине металла до 100 мм.

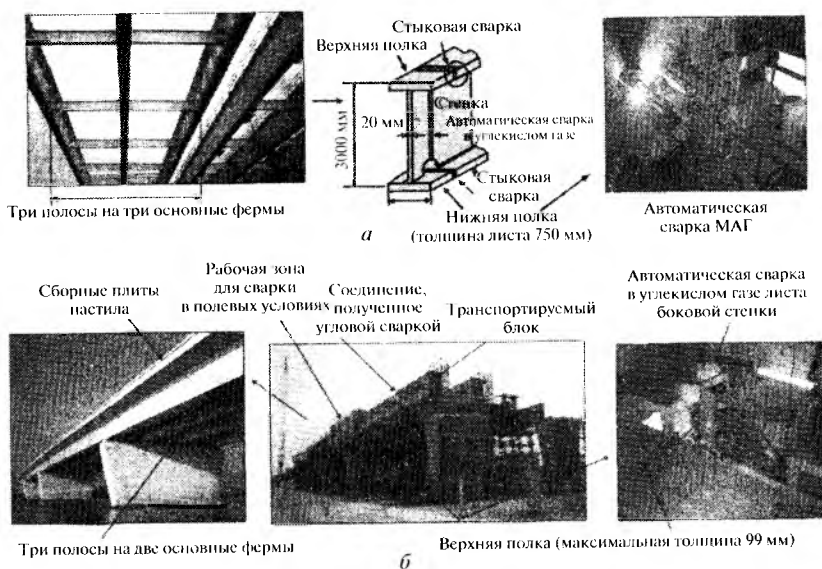


Рис. П1.4. Конструкция моста, созданная на основе концепции рационального проектирования, и сварка в полевых условиях:

а — мост с плоскими фермами; б — мост с коробчатыми фермами

Мост через реку Иртыш в Казахстане построен японской строительной компанией. Блоки ферм жесткости изготавливали в Японии и перевозили к месту строительства по железной дороге. Здесь их собирали в более крупные блоки, которые поднимали, соединяли с тросовыми подвесками и сваривали друг с другом. Материалы для строительства моста рассчитаны на эксплуатацию при температуре до -50°C . При строительстве моста использовали сталь ТМСП, при этом тепловложение при сварке было ограничено до определенного уровня.

Обычно при сооружении главного пилона подвесного моста блоки пилона соединяли посредством фрикционного зажима с применением болтов высокого натяжения. При строительстве моста Хакучо конструкции впервые соединили с помощью сварки и получили пилон с гладкими красивыми поверхностями. При строительстве пилона подвесного моста требовалась точность менее $1/5000$ (20 мм на 100 м), а для предотвращения сварочных деформаций применяли специальные меры. Степень усадки при сварке соединений на блоках зависела от режима сварки. Чтобы снизить до минимума изгиб пилона, обеспечивалось равномерное сжатие блока по всему сечению. Для другого подвесного моста пилоны высотой 100 м изготавливали в заводских условиях, затем их транспортировали на место строительства по морю и устанавливали пакетами с помощью плавучего крана.

В 2003 г. рядом с мостом Чокинес в США был построен новый подвесной мост. Блоки ферм массой до 600 т изготавливали в Японии и зимой транспортировали по северной части Тихого океана. Блоки соединяли друг с другом непосредственно на месте строительства. При сварке листов палубного настила в цеховых условиях к качеству сварных соединений на сквозных ребрах жесткости предъявлялись очень высокие требования с целью предупреждения усталостных разрушений.

Технологии лазерной сварки и сварки трением с перемешиванием. В Европе лазерную сварку и сварку трением с перемешиванием все активнее применяют при строительстве судов. В Японии эти способы сварки менее популярны, чем в Европе, поскольку на японских судостроительных верфях строят в основном океанские ко-

рабли. Однако в других отраслях промышленности Японии оба эти способа сварки находят все более широкое применение.

Сварка трением с перемешиванием активно внедряется в Японии для изготовления железнодорожных вагонов (рис. П1.5). В начальный период эксплуатации поезда-«пули» в качестве конструкционного материала для кузова вагона использовали сталь, при сборке конструкции кузовов вагонов полумонококового (полумоноблочного) типа применяли точечную сварку. В настоящее время кузова вагонов изготавливают из алюминиевых сплавов, благодаря чему снижена масса конструкции и соответственно повысилась скорость сварки. Конструкция кузова изменилась от стальной полумонококовой до сварной с двойной обшивкой из прессованных алюминиевых прутков.

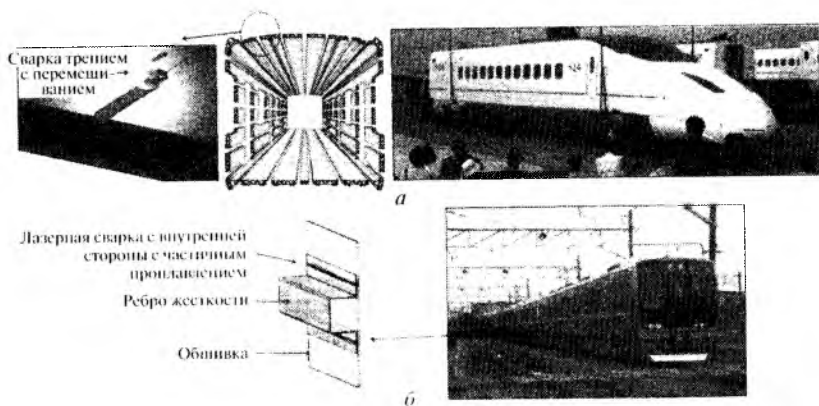


Рис. П1.5. Применение сварки трением с перемешиванием для строительства японского поезда-«пули» (а) и лазерной сварки при строительстве железнодорожных вагонов (б)

С целью повышения конструкционной прочности и безопасности железнодорожных вагонов точечная сварка была заменена лазерной. В последнее время лазерную сварку также применяют для соединения прессованных полос из алюминиевых сплавов, из которых изготавливают двойную обшивку железнодорожных вагонов.

Техносуперлайнер — сверхскоростное судно, первое и пока единственное японское судно, где при изготовлении корпуса применялась сварка трением с перемешиванием. При строи-

тельстве верхних палуб на суперлайнере использовали панели жесткости, сваренные указанным способом сварки из прессованных полос.

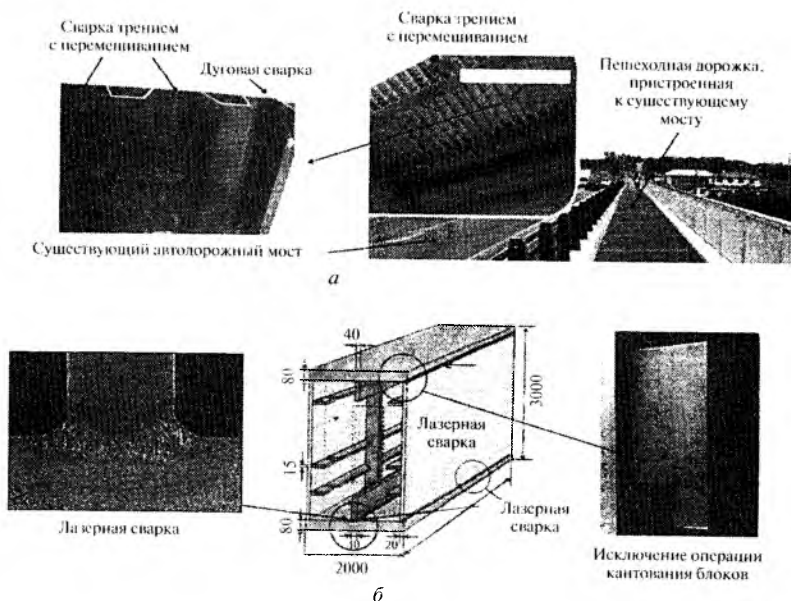


Рис. П1.6. Применение сварки трением с перемешиванием для получения элемента моста (а) и концепция использования лазерной сварки (б)

На рис. П1.6, а показан мост с пешеходной дорожкой, которую пристроили к уже существующему мосту. Для снижения массы конструкции дорожки из новых блоков использовали плоские алюминиевые листы настила, соединенные с прессованными прутками сваркой трением с перемешиванием, которую выполняли в поперечном направлении по отношению к осевому направлению моста. Ширина свариваемой панели ограничивалась 2—3 мм. Для получения блока дуговой сваркой соединяли несколько панелей, сваренных сваркой трением с перемешиванием, которую выполняла компания — изготовитель алюминия.

На рис. П1.6, б представлена концепция использования лазерной сварки для получения коробчатой фермы моста. Лазер-

ная сварка позволяет получать большие блоки мостов без трудоемких операций кантования, которые необходимы при дуговой сварке. Кроме того, предполагается, что лазерная сварка ребер жесткости будет способствовать повышению их временного сопротивления.

Нанотехнологии в сварке и родственных процессах

Нанотехнологии позволяют разрабатывать материалы и композиты на их основе с регулированием свойств на атомном и молекулярном уровне, которые все активнее используются в сварке.

Улучшение структуры швов жаропрочных сплавов, выполненных электронно-лучевой сваркой. Для предотвращения образования горячих трещин в швах и обеспечения комплекса механических, технологических и служебных характеристик жаропрочных сплавов при электронно-лучевой сварке в качестве присадочного сварочного материала используют тонкие композиционные фольги, состоящие из компонентов наноразмерного масштаба и получаемые совместной конденсацией из паровой фазы различных компонентов.

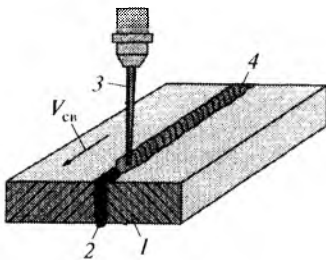


Рис. П2.1. Схема процесса ЭЛС с применением наноструктурированной фольги в качестве присадки:
1 – свариваемый металл; 2 – присадочная фольга; 3 – электронный луч;
4 – шов

На рис. П2.1 показана схема выполнения электронно-лучевой сварки никеля с применением в качестве присадки наноструктурированной фольги на основе композита системы Ni–NbC толщиной 50–150 мкм. При использовании присадочной наноструктурированной фольги наблюдается некоторое уменьшение размера зерен и выявляется внутренняя субструктура зерен (рис. П2.2); одновременно значительно возрастают и прочностные характеристики сварных швов.

В контактной стыковой сварке жаропрочного никелевого сплава применение наноструктурных фольг систем Ti–Al,

Ag—Cu позволяет снизить температуру процесса и тем самым предотвратить разупрочнение основного металла.

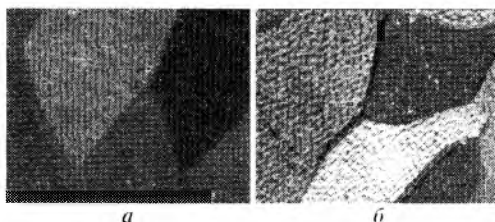


Рис. П2.2. Микроструктура металла сварных швов, выполненных на никеле без наноструктурированной присадки (а) и с использованием присадочной фольги Ni—6,7 % NbC (б)

Плазмохимическая технология — один из наиболее перспективных способов получения широкой номенклатуры наноразмерных порошков металлов и соединений. Взаимодействие термической плазмы с обрабатываемым веществом обеспечивает практически для любых тугоплавких и трудноиспаряемых материалов плавление, испарение, термическое разложение, восстановление и синтез с получением путем регулируемой конденсации дисперсного продукта с частицами размером на уровне нанометров (вплоть до размеров критического зародыша или кластера).

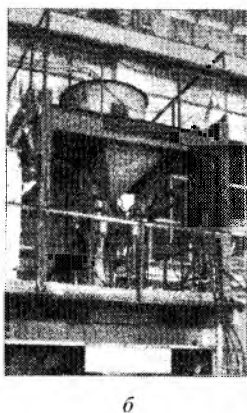
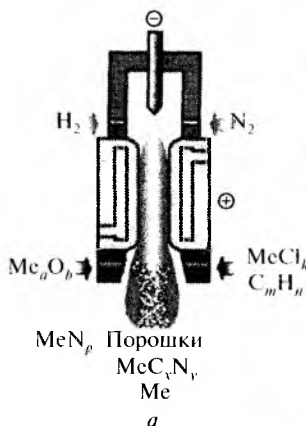


Рис. П2.3. Принципиальная схема (а) струйно-плазменной технологии получения нанопорошков и промышленная плазменная установка мощностью 250 кВт для получения ультрадисперсных порошков вольфрама (б)

Особые свойства высокодисперсных сред определяют такие области их возможного применения, как металлокерамика, активаторы компактирования, добавки к смазочным маслам, пигменты, модификаторы металлов и сплавов, катализаторы. Получение порошков с помощью воздействия химически активной термической плазмы (как правило, процесс

восстановления и синтеза) может быть осуществлено как струйно-плазменный процесс, принципиальная схема которого применительно к производству порошков в термической плазме электродугового разряда приведена на рис. П2.3. Одно из направлений использования нанопорошков связано с созданием высокоэффективного режущего инструмента. Принципиальная аппаратурно-технологическая схема производства на основе наноструктурированных твердых сплавов нового ассортимента режущего инструмента представлена на рис. П2.4.

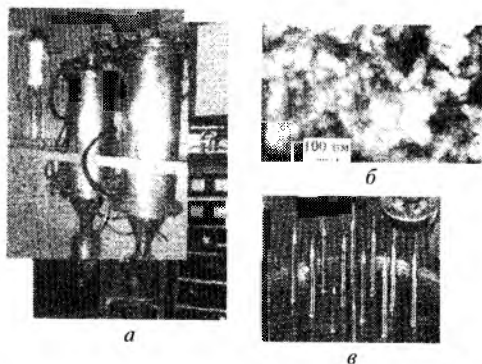


Рис. П2.4. Аппаратурно-технологическая схема производства инструмента на основе наноструктурных твердых сплавов:
а — плазмохимическая установка; б — нанопорошок WC; в — наноструктурный твердосплавный инструмент

При использовании нанослойных прослоек достигается улучшение качества *диффузионной сварки*. Если в сварном соединении без прослоек (рис. П2.5, а) четко проявляется граница раздела и не происходит образования общих зерен, то при использовании прослойки Ti/Al в зоне соединения (рис. П2.5, б) формируются мелкие равноосные зерна, прорастающие в основной металл.

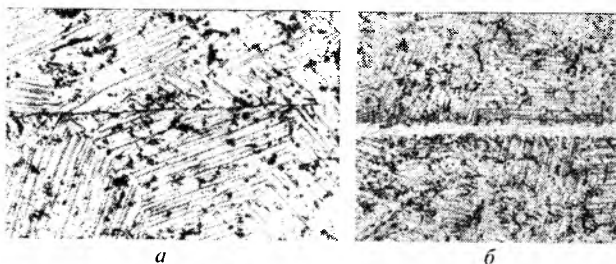


Рис. П2.5. Микроструктура зоны соединения сплава γ -AlTi при диффузионной сварке без промежуточной прослойки (а, $\times 500$) и с использованием нанослойной прослойки Ti/Al (б, $\times 200$)

Библиографический список

- Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демянцевич В.П.* Технология и оборудование сварки плавлением. М. : Машиностроение, 1977. 432 с.
- Алёшин Н.П., Щербицкий В.Г.* Контроль качества сварочных работ. М. : Высш. школа, 1986. 207 с.
- Андреев В.В.* Инверторные источники питания сварочной дуги // Сварщик. 1999. № 6. С. 25–29.
- Бернадский В.Н.* Гибридные технологии сварки и соединения // Сварщик. 2009. № 6. С. 23–31.
- Бернадский В.Н.* Япония определяет приоритеты в области сварки // Автоматическая сварка. 2002. № 3. С. 46–49.
- Бернадский В.Н., Мазур А.А.* Состояние и перспективы сварочного рынка // Автоматическая сварка. 1999. № 11. С. 49–55.
- Блащук В.Е.* Металл и сварка в монументальной скульптуре // Автоматическая сварка. 2002. № 5. С. 46–52.
- Бокарев Д.И.* Сварка пластмасс и склеивание металлов : учеб. пособие. Воронеж : ВГТУ, 2004. 172 с.
- Бурденков Н.А., Кириленко В.С., Романченко Ю.В.* Автоматизированное проектирование раскроя листового материала на машинах термической резки // Сварочное производство. 2001. № 7. С. 31–36.
- Влияние нанофольги системы Ni-NbC на структуру швов жаропрочных сплавов, выполненных электронно-лучевой сваркой / К.А. Ющенко, А.И. Устинов, Б.А. Задерий [и др.] // Автоматическая сварка. 2010. № 11. С. 5–11.*
- Вневакуумная электронно-лучевая сварка конструкционных сплавов / Ф.В. Бах, А. Беньяш, К. Лау [и др.] // Автоматическая сварка. 2009. № 5. С. 29–34.*
- Волченко В.Н.* Контроль качества сварных конструкций. М. : Машиностроение, 1986. 152 с.

- Воропай Н.М., Илюшенко В.М., Мишенков В.А.* Комбинированный процесс точечной плазменно-дуговой сварки // Сварщик. 2004. № 4 (38). С. 26–29.
- Демченко В.Ф., Рябцев И.А., Козлитина С.С.* Компьютерные системы проектирования технологий электродуговой наплавки // Автоматическая сварка. 1998. № 11. С. 61–66.
- Демченко Ю.В.* О термитной сварке // Сварщик. 2004. № 3 (37). С. 27.
- Жадкевич А.М.* История возникновения, технологические особенности и технические возможности первых способов пайки // Автоматическая сварка. 2004. № 11. С. 43–48.
- Иллюстрированное пособие сварщика / В.А. Лосев, Н.А. Юхин, В.П. Гасилин [и др.]. М. : СОУЭЛО, 2000. 56 с.*
- Кайдалов А.А., Истомин Е.И.* Электронно-лучевая резка // Сварщик. 2003. № 3 (31). С. 34–35.
- Капустин А.Э., Бардусова И.И., Колосов В.В.* Компьютерные технологии и рентгеновская дефектоскопия сварных соединений // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2001. № 4. С. 14–20.
- Ках П., Мартикаинен Дж.* Особенности применения гибридной лазерно-дуговой сварки // Автоматическая сварка. 2010. № 6. С. 38–47.
- Ковтуненко В.А.* Мост им. Е.О. Патона спустя полвека // Автоматическая сварка. 1997. № 7. С. 42–51.
- Компьютерный комплекс для исследования и управления процессами сварки / А.С. Климов, Н.П. Анциборов, А.А. Герасимов, М.С. Гончаров // Сварочное производство. 2006. № 3. С. 32–34.*
- Кононенко В.Я.* Разработки ИЭС им. Е.О. Патона в области подводной сварки и резки // Автоматическая сварка. 2004. № 3. С. 47–52.
- Корниенко А.Н.* Вологдин Виктор Петрович — первый сварщик-судостроитель // Сварщик. 2002. № 4. С. 54.
- Корниенко А.Н.* Первые изобретения в области контактной сварки // Автоматическая сварка. 1996. № 5. С. 45–52.
- Корниенко А.Н.* Переход сварки на научные основы // Автоматическая сварка. 1998. № 7. С. 40–47.
- Корниенко А.Н.* Сварочная техника в годы Второй мировой войны // Автоматическая сварка. 1997. № 7. С. 42–51.

- Корниенко А.Н.* У истоков «электрогефеста». М. : Машиностроение, 1987. 168 с.
- Кучук-Яценко В.С.* Контактная стыковая сварка жаропрочного никелевого сплава с использованием наноструктурных фольг // Автоматическая сварка. 2011. № 11. С. 16–19.
- Лашенко Г.И.* Энергосберегающие технологии снижения остаточных напряжений в сварных конструкциях // Сварщик в России. 2006. № 1. С. 15–18.
- Лобов В.А.* Современные компьютерные технологии металлографического контроля сварных соединений нефтехимического оборудования // Сварка в Сибири. 2001. № 2 (6). С. 6–11.
- Лобанов Л.М., Пивторак В.А.* Диагностика сварных конструкций методами электронной ширографии и спекл-интерферометрии // Автоматическая сварка. 2008. № 11. С. 195–203.
- Медведев С.В., Кункевич Д.П.* Опыт компьютерного проектирования сборочно-сварочной технологической оснастки // Автоматическая сварка. 2001. № 3. С. 41–44.
- Медведев С.В., Ракович А.Г.* Компьютерная технология проектирования сборочно-сварочной технологической оснастки // Автоматическая сварка. 1997. № 7. С. 33–38.
- Миддельдорф К., Хоффе Д. фон.* Тенденции развития технологий соединения материалов // Автоматическая сварка. 2008. № 11. С. 39–47.
- Николаев Г.А., Ольшанский Н.А.* Специальные методы сварки. М. : Машиностроение, 1975. 231 с.
- Однопроходная электродуговая сварка закладным электродом / Г.В. Кузьменко, В.Г. Кузьменко, В.И. Галинич [и др.] // Автоматическая сварка. 2006. № 6. С. 44–48.
- Патон Б.Е.* Проблемы сварки на рубеже веков // Сварщик. 1999. № 1 (5). С. 2–3.
- Патон Б.Е.* Сварка и родственные технологии в медицине // Автоматическая сварка. 2008. № 11. С. 13–23.
- Патон Б.Е., Корниенко А.Н.* Огонь сшивает металл. М. : Педагогика, 1988. 144 с.
- Петров А.В., Черненький В.М.* Разработка САПР. В 10 кн. Кн. 1. Проблемы и принципы создания САПР : практ. пособие ; под ред. А.В. Петрова. М. : Высш. шк., 1990. 143 с.

- Пустовойтов А.В., Добрыдень В.А.* Компьютерный расчет малогабаритных вытяжных устройств сварочных постов // Сварочное производство. 2002. № 5. С. 53–55.
- Пыхалов А.А., Высотский А.В., Унгаев Е.И.* Применение метода конечных элементов в сварочном производстве // Сварка в Сибири. 2002. № 1 (7). С. 43–46.
- Сварка в машиностроении : справочник. В 4 т. ; редкол. Г.А. Николаев и др. М. : Машиностроение, 1978. Т. 2. 462 с.
- Сварка в СССР. Т. 1. Развитие сварочной техники и науки о сварке. Технологические процессы, сварочные материалы и оборудование. М. : Наука. 1981. 533 с.
- Свенссон Л.Э., Элвандер Дж.* Сварочные материалы нового тысячелетия // Сварка в Сибири. 2001. № 1 (5). С. 30–41.
- Словарь технических терминов / Стеклов О.И. [и др.] // Сварщик-профессионал. 2002. № 6. С. 20; 2003. № 1. С. 17; 2003. № 2. С. 21.
- Состояние и перспективы применения высокоэффективных сварочных технологий / У. Дилтай, Л. Штайн, К. Вёсте, Ф. Райх // Автоматическая сварка. 2003. № 10–11. С. 151–157.
- Специальные методы сварки и пайки / В.А. Саликов, М.Н. Шушпанов, В.В. Пешков, А.Б. Коломенский. Воронеж : ВГТУ. 2000. 214 с.
- Теория сварочных процессов ; под ред. В.В. Фролова. М. : Высш. школа, 1988. 559 с.
- Технология и оборудование сварки плавлением ; под ред. Г.Д. Никифорова. М. : Машиностроение, 1986. 320 с.
- Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением ; под ред. Б.Е. Патона. М. : Машиностроение, 1974. 768 с.
- Технология создания неразъемных соединений при производстве газотурбинных двигателей / Ю.С. Елисеев, С.Б. Масленков, В.А. Гейкин, В.А. Поклад. М. : Наука и технологии, 2001. 544 с.
- Третьяк Н.Г.* Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (обзор) // Автоматическая сварка. 2002. № 7. С. 12–21.
- Фетисов Г.П.* Сварка и пайка в авиационной промышленности. М. : Машиностроение, 1983. 216 с.
- Фивейский А.М.* Инновационные сварочные процессы // Сварщик в России. 2007. № 2 (6). С. 51–53.

- Фролов В.В., Парахин В.А.* Молодежи о сварке. М. : Машиностроение, 1979. 111 с.
- Холопов Ю.В., Башенко В.В.* Ультразвуковая сварка вчера, сегодня и завтра // Сварщик. 2007. № 2. С. 26–28.
- Хорн Ф.* Атлас структур сварных соединений ; пер. с нем. М. : Металлургия, 1977. 288 с.
- Цветков Ю.В., Самохин А.В.* Плазменная нанопорошковая металлургия // Автоматическая сварка. 2008. № 11. С. 171–175.
- Шебеко Л.П.* Оборудование и технология дуговой автоматической сварки. М. : Высшая школа, 1986. 279 с.
- Шелягин В.Д., Хаскин В.Ю.* Тенденции развития лазерно-дуговой сварки // Автоматическая сварка. 2002. № 6. С. 28–32.
- Электролизеры для получения водородно-кислородного пламени, получаемого при газопламенной обработке материалов / В.Н. Хромов, А.Л. Семишин, А.Ю. Родичев [и др.] // Сварочное производство. 2005. № 5. С. 38–48.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ИЗ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ СВАРКИ	11
1.1. Сварка в древности	11
1.2. История возникновения и развития пайки	16
1.3. Рождение и развитие электродуговой сварки	22
1.4. Процесс контактной электросварки	31
1.5. Разработка процесса газовой сварки	36
1.6. Сварка в годы Второй мировой войны	46
1.7. Переход сварки на научные основы	51
1.8. Современная классификация способов сварки	53
Контрольные вопросы	55
ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ СВАРКИ	57
2.1. Термины и определения	57
2.2. Образование межзатомных связей при сварке	61
2.3. Нагрев металла при сварке плавлением	66
2.4. Особенности формирования химического состава металла шва	69
2.5. Микроструктура сварного соединения	71
2.6. Причины возникновения напряжений и характер деформаций	75
2.7. Снижение деформаций на стадии проектирования конструкций, до сварки и при выполнении сварки	79
2.8. Классификация способов дуговой сварки	82
Контрольные вопросы	84
ГЛАВА 3. СВАРКА ПЛАВЛЕНИЕМ. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА	85
3.1. Электрическая дуга и ее свойства	85
3.2. Источники питания сварочной дуги	89
3.3. Дуговая сварка покрытыми электродами	97
3.4. Автоматическая сварка под флюсом	104
3.5. Дуговая сварка в среде инертных газов	110
3.6. Дуговая сварка в углекислом газе	123
3.7. Дуговая сварка под водой	130
3.8. Дуговая плазменная сварка	134
3.9. Комбинированный процесс точечной плазменно-дуговой сварки	139
Контрольные вопросы	141

ГЛАВА 4. НОВЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ.	143
4.1. Электрошлаковая сварка	143
4.2. Сварка электронным лучом	147
4.3. Сварка лазером.	156
4.4. Лазерно-дуговая сварка	161
Контрольные вопросы	167
ГЛАВА 5. СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ.	168
5.1. Контактная сварка	168
5.2. Сварка токами высокой частоты.	178
5.3. Холодная сварка	179
5.4. Сварка взрывом	184
5.5. Магнитно-импульсная сварка.	188
5.6. Сварка трением	191
5.7. Ультразвуковая сварка	202
5.8. Сварка прокаткой	206
5.9. Термитная сварка	208
5.10. Диффузионная сварка	210
Контрольные вопросы	218
ГЛАВА 6. ПРОЦЕССЫ, РОДСТВЕННЫЕ СВАРКЕ	219
6.1. Соединение пластмасс	219
6.2. Пайка	231
6.3. Наплавка и напыление	237
6.4. Резка металлов и неметаллических материалов.	244
Контрольные вопросы	253
ГЛАВА 7. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	255
7.1. Проектирование сварных конструкций	255
7.2. Заготовительные работы в производстве сварных конструкций.	261
7.3. Подготовка заготовок под сварку	266
7.4. Сборочные работы	269
7.5. Сварочные работы	271
7.6. Дополнительная обработка сваренных узлов	284
7.7. Контроль качества сварных соединений	293
7.8. Применение компьютерных технологий в сварочном производстве	331
Контрольные вопросы	345

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. СВАРКА В XXI в.	347
<i>Приложение 1. Технологии сварки в современной промышленности Японии</i>	359
<i>Приложение 2. Нанотехнологии в сварке и родственных процессах</i>	370
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.	373

Учебное издание

Фролов Вадим Анатольевич,
Пешков Владимир Владимирович,
Коломенский Александр Борисович,
Казаков Валентин Алексеевич

Сварка. Введение в специальность

Учебное пособие

Оформление художника *С.Б. Дьякова*
Художественный редактор *А.В. Антипов*
Компьютерная верстка *А.В. Антипова*
Корректор *Ю.В. Жаркова*

Подписано в печать 27.11.2014
Формат 60×90/16. Бумага офсетная
Печ. л. 24,0. Усл. печ. л. 24,0
Уч.-изд. л. 25,17. Тираж 1000 экз.

ООО «Издательский Дом «Альфа-М»
Адрес: 127282, Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1
Тел./факс: (495) 280-1596 (доб. 573)
E-mail: alfa-m@inbox.ru

ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М»
Адрес: 127282, Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1

По вопросам приобретения книг обращайтесь:

- Отдел продаж «ИНФРА-М». 127282, Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1;
тел.: (495) 280-1596; *факс:* (495) 280-3629; *e-mail:* books@infra.ru
- Отдел «Книга—почтой», *тел.:* (495) 280-1596 (доб. 246)



ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М»



Издательский Дом «Альфа-М»

**В.А. Фролов, В.Р. Петренко, А.В. Пешков,
А.Б. Коломенский, В.А. Казаков**

Технология сварки плавлением и термической резки металлов

Учебное пособие

Под ред. В.А. Фролова.

М. : Альфа-М : ИНФРА-М, 2011. – 448 с. : ил.

ISBN 978-5-98281-223-0 («Альфа-М»)

ISBN 978-5-16-004512-2 («ИНФРА-М»)

Гриф УМО

Изложены современные представления о природе образования сварного соединения и свариваемости металлов. Рассмотрены технологические особенности основных методов сварки плавлением и термической резки конструкционных материалов. Приведены основные характеристики современных свариваемых и сварочных материалов. Даны рекомендации по технологии сварки металлов и характеристики современного сварочного оборудования. Предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Машиностроительные технологии и оборудование», специальности «Оборудование и технология сварочного производства».

- По вопросам **оптового заказа** следует обращаться в отдел продаж «ИНФРА-М»: 127282, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1
тел.: (495) 363-4260 (многоканальный)
факс: (495) 363-9212
e-mail: books@infra-m.ru
<http://www.infra-m.ru>



ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М»



Издательский Дом «Альфа-М»

**Е.А. Кудряшов, С.Г. Емельянов,
Е.И. Яцун, Е.В. Павлов**

Материалы и технологические процессы машиностроительных производств

Учебное пособие

М. : Альфа-М : ИНФРА-М, 2012. – 256 с. : ил.
(Технологический сервис)

ISBN 978-5-98281-310-7 («Альфа-М»)

ISBN 978-5-16-006091-0 («ИНФРА-М»)

Гриф УО РФ

Рассмотрены основные технологические процессы производства промышленных материалов в различных отраслях промышленности. Дается классификация важнейших видов промышленных материалов как предпосылка создания технологий для их получения.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров «Материаловедение и технологии материалов».

- По вопросам **оптового заказа** следует обращаться в отдел продаж «ИНФРА-М»
127282, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1
тел.: (495) 363-4266 (многоканальный)
факс: (495) 363-9212
e-mail: books@infra-m.ru
<http://www.infra-m.ru>

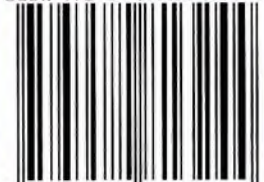


Сварка Введение в специальность

Учебное пособие

Допущено Учебным объединением высших учебных заведений РФ по образованию в области материаловедения, технологии материалов и покрытий в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 150100 «Материаловедение и технологии материалов»

ISBN 978-5-98281-324-4



9 785982 813244