

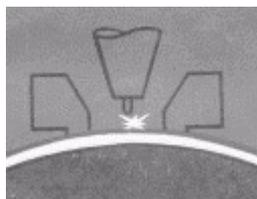
В.В. Пешков, А.Б. Коломенский, В.А. Фролов,
В.А. Казаков

СВАРКА

ВВЕДЕНИЕ В СПЕЦИАЛЬНОСТЬ

Под редакцией д-ра техн. наук В.А. Фролова

Рекомендовано Министерством образования РФ в качестве учебника
для студентов, обучающихся по специальностям
120500 "Оборудование и технология сварочного производства"
и 110700 "Металлургия сварочного производства"



Воронеж

2002

Сварка. Введение в специальность

Введение

1. ЧТО ТАКОЕ СВАРКА?

- 1.1. Образование межатомных связей при сварке
- 1.2. Особенности формирования химического состава металла шва
- 1.3. Микроструктура сварного соединения
- 1.4. Напряжения и деформации при сварке

2. ИЗ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ СВАРКИ

- 2.1. Сварка в древности
- 2.2. Рождение и развитие электродуговой сварки
- 2.3. Разработка процесса контактной электросварки
- 2.4. Разработка процесса газовой сварки
- 2.5. Сварка в годы Второй Мировой войны

3. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ СВАРКИ СЕГОДНЯ

- 3.1. Классификация видов сварки
- 3.2. Электрическая дуговая сварка
 - 3.2.1. Электрическая дуга и её свойства
 - 3.2.2. Источники питания сварочной дуги
 - 3.2.3. Ручная дуговая сварка покрытыми электродами
 - 3.2.4. Автоматическая сварка под флюсом
 - 3.2.5. Сварка в среде инертных газов
 - 3.2.6. Сварка в углекислом газе
 - 3.2.7. Плазменная сварка
- 3.3. Электрошлаковая сварка
- 3.4. Сварка электронным лучом
- 3.5. Сварка лазером
- 3.6. Контактная сварка
 - 3.6.1. Точечная сварка
 - 3.6.2. Шовная сварка
 - 3.6.3. Рельефная сварка
 - 3.6.4. Стыковая сварка
- 3.7. Сварка токами высокой частоты
- 3.8. Холодная сварка
- 3.9. Сварка взрывом
- 3.10. Магнитно-импульсная сварка
- 3.11. Сварка трением
- 3.12. Ультразвуковая сварка
- 3.13. Сварка прокаткой
- 3.14. Диффузионная сварка
- 3.15. Пайка
- 3.16. Наплавка и напыление
- 3.17. Резка металлов и неметаллических материалов

4. СВАРКА В XXI ВЕКЕ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ВВЕДЕНИЕ

Сварка принадлежит к числу великих русских изобретений. Она чудесно преобразила лицо многих технологических процессов производства машин и механизмов, строительства судов и сооружений, играет важную роль в освоении космоса.

Сварка сыграла важную роль в выполнении первых пятилеток, индустриализации нашей страны, в оснащении Советской Армии могучей боевой техникой в грозные годы Великой Отечественной войны, в восстановлении и подъёме народного хозяйства в послевоенный период.

В настоящее время сварка превратилась в крупный самостоятельный вид производства. Она применяется для создания и возведения принципиально новых конструкций и сооружений, для ремонта машин и аппаратов, для получения изделий со специальными свойствами. Сварные конструкции несут свою службу 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.1-7).

Сварку используют и для создания скульптур в монументальном искусстве (рис.8).

Сварку выполняют на воздухе, под водой, в вакууме (рис.9). Лётчики-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 полёта станции "Союз-7" в открытом космосе в течение трёх часов производилась сварка, резка и пайка металлов, что показало возможность выполнения различных ремонтных работ космических аппаратов.

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

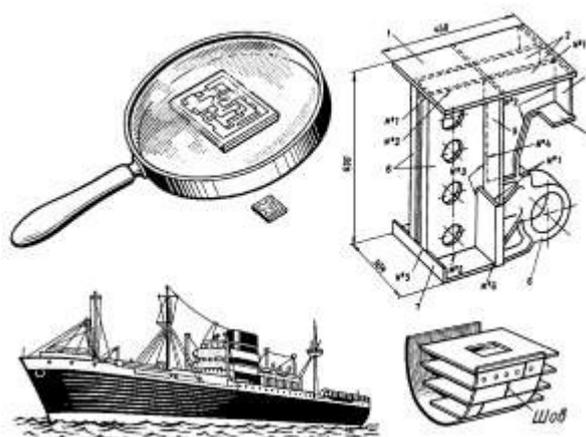


Рис. 1. Примеры выполнения сварных конструкций в технике

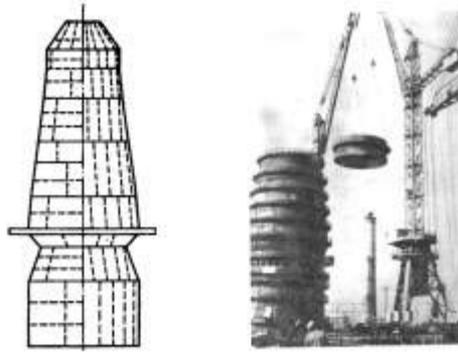


Рис.2. Сварная конструкция кожуха доменной печи: а - схема раскроя листов кожуха; б - подъем элемента кожуха для сварки кольцевого шва

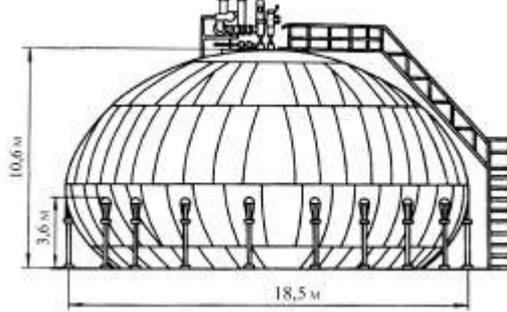
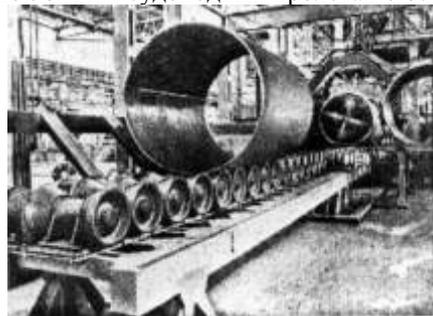


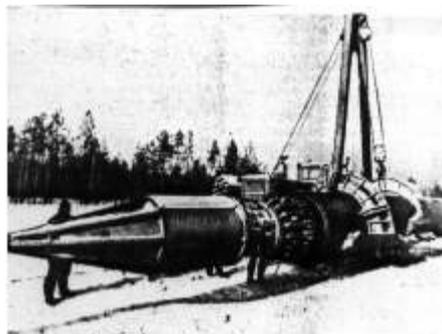
Рис.3. Сварной резервуар для хранения нефтепродуктов, работающий под давлением



Рис.4. Уникальное сооружение среди цельносварных мостов мира - автомобильный мост имени Е.О. Патона через Днепр в г. Киеве. Длина моста 1542 м, общая масса - 10 тыс. т, 20 пролётов по 58 м и 4 судоходных пролёта по 87 м



а



б

Рис.5. Сварка труб: а - сборка и сварка многослойных труб диаметром 1420 мм; б - машина К-700-1 для сварки стыков трубы в полевых условиях

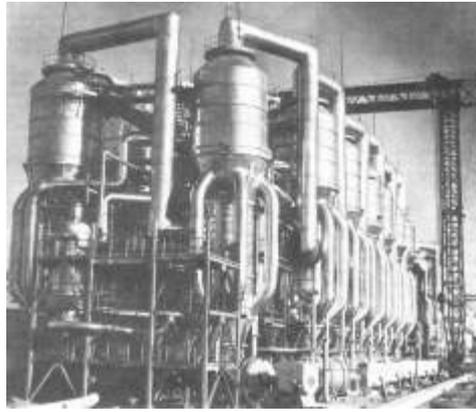


Рис.6. Сварные конструкции Шевченковского атомного реактора на быстрых нейтронах

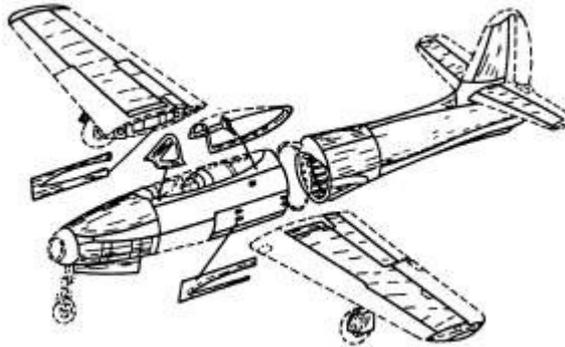


Рис.7. Схема расположения сварных соединений самолёта "Фиат" - одного из первых в истории авиации с широким применением сварки в ответственных узлах



Рис.8. Скульптура В.И.Мухиной "Рабочий и колхозница" (а) и фрагмент скульптуры - летящий по ветру шарф, придающий всей скульптуре стремительность (б)

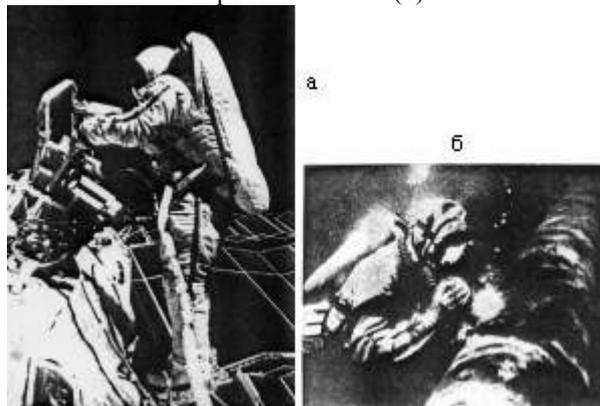


Рис.9. Сварка в космосе (а) и под водой (б)

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 уверенно утверждать, что в цепи неостановимого технического прогресса сварка, как важный научно-технологический процесс, является существенным его звеном. И если отмирание некоторых производств происходит незаметно, безболезненно или с малыми, относительно несущественными последствиями, то гипотетическое удаление сварки из суммы

технологий на сегодняшний день однозначно приведёт к полной остановке технических и смежных с ними отраслей промышленности.

Создание и продвижение в жизнь всё новых и новых материалов с всё более ярким спектром их характеристик неразрывно связано с усложнением и постоянным развитием служебных свойств машин и механизмов в самом широком смысле их понятий. И здесь без сварки не обойтись никаким образом.

Молодость сварки, её широта и универсализм, высокая экономическая эффективность служат залогом дальнейшего плодотворного развития сварочной науки и техники.

Сварке металлов и неметаллов, несомненно, принадлежит огромное будущее, считает академик Б.Е. Патон, дважды Герой Социалистического труда, лауреат Ленинской и Государственных премий.

Глубоко символичен девиз широко известной немецкой фирмы BINZEL, выпускающей сварочное оборудование:

"МИР ВРАЩАЕТСЯ ВОКРУГ СВАРКИ".

1. ЧТО ТАКОЕ СВАРКА*?

На протяжении всего периода существования человека на Земле - в том числе, в каменном, бронзовом и железном веках - ему приходилось решать задачу соединения между собой двух или более отдельных частей в единое монолитное изделие, т. е. получать неразъёмные 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 всё более сложной и актуальной.

Хорошо известно, что конструкционные материалы представляют собой агрегат атомов (ионов), находящихся во взаимодействии. Физические и прочностные характеристики твёрдых 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 как силы притяжения, так и силы отталкивания. При определенном расстоянии между частицами эти силы уравновешивают друг друга, что и соответствует равновесному состоянию кристалла.

В грубом приближении это может быть пояснено механической моделью (рис.1.1), представляющей собой два шарика, соединенных натянутым резиновым шнуром и сжатой спиральной пружиной. Шарик находятся в равновесии, так как сила натяжения шнура уравновешена расталкивающей силой сжатия пружины.



Рис.1.1. Модель межатомных сил в твёрдом теле

На самом же 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.

При образовании металлов атомы сближаются на расстояние $0,0002...0,0003$ мкм, когда волновые функции валентных электронов перекрываются, и эти электроны получают возможность переходить

от одного атома к другому, довольно свободно перемещаясь по всему объёму металла. Поэтому валентные электроны принято называть "коллективизированными", а связь, существующую между ионами, - металлической. Металлическую связь можно представить как связь, возникающую за счёт притяжения между решёткой из положительно заряженных ионов и окружающими их "коллективизированными" электронами, оказывающими стягивающее действие.

*По одной из версий происхождение слова "сварка" связывают с именем древнеславянского языческого бога Солнца и огня Сварога.

1.1. Образование межатомных связей при сварке

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.

Для пояснения процесса образования сварного соединения рассмотрим схематически случай соединения двух монокристаллов с идеально чистыми и идеально ровными поверхностями (рис.1.2).

Соединение таких монокристаллов (состояние "а") в единое целое (состояние "б") произойдёт, если сблизить их поверхности на расстояние равное или близкое по величине параметру кристаллической решётки - 0,0002...0,0003 мкм.

Сварка реальных твёрдых тел затрудняется рядом факторов. Реальные тела - поликристаллические. Они не имеют идеально чистых и идеально гладких поверхностей.

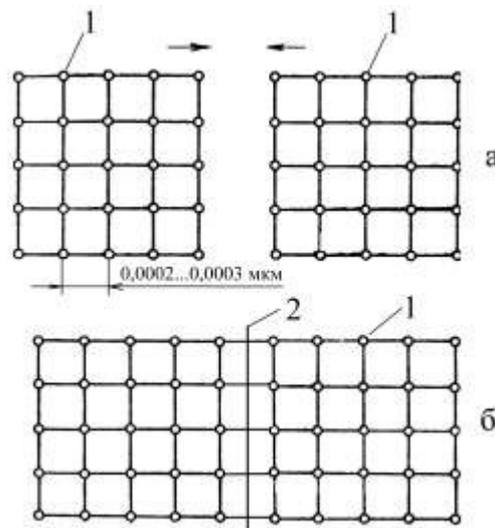


Рис. 1.2. Схема образования сварного соединения между двумя монокристаллами: а - монокристаллы до сварки; б - монокристаллов после сварки; 1 - ион кристаллической решётки; 2 - граница сварного соединения

После механической обработки на поверхности металлов присутствуют макроскопическая и микроскопическая геометрическая неоднородность - волнистость и шероховатость соответственно. Микровыступы располагаются на волнистой поверхности, шаг которой может составлять от 1000 до 10000 мкм, а высота микровыступов от нескольких микрон (после шлифования) до десятков микрон (после токарной и фрезерной обработки), что на несколько порядков больше параметра кристаллической решётки.

При сближении таких поверхностей их контактирование произойдёт не по всей поверхности, а лишь в отдельных точках (рис.1.3).

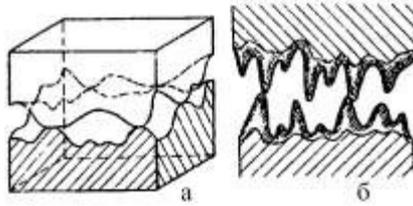


Рис.1.3. Модель контакта твёрдых тел по макроскопической волнистости (а) и микроскопической шероховатости (б) поверхностей

Задача соединения реальных поверхностей металлов в одно целое значительно осложняется и наличием на контактных поверхностях помимо микровыступов оксидов, адсорбированных газов, влаги, органических (жировых) загрязнений.

Образование металлических связей возможно при условии удаления с контактных поверхностей загрязнений (наиболее прочными из которых являются оксиды) и обеспечения сплошности физического контакта, т. е. сближения свариваемых поверхностей на расстояние параметра кристаллической решётки по всей поверхности соединения.

При всех способах сварки предварительно соединяемые поверхности подвергают обработке, обеспечивающей удаление поверхностных загрязнений и определённую геометрию поверхности.

Однако, в атмосфере воздуха на очищенных поверхностях уже за $2,4 \times 10^{-9}$ образуется мономолекулярный слой газа, поэтому, как бы ни очищали поверхности металла перед сваркой, они всегда оказываются покрытыми слоем оксида.

Наименьшую высоту микровыступов на свариваемых поверхностях обеспечивает их особо чистовое полирование, но и после такой трудоёмкой обработки высота микровыступов в сотни раз больше параметра кристаллической решётки.

Поэтому образование сварного соединения (сближение свариваемых поверхностей, удаление оксидов и образование металлических связей) может происходить в процессе пластической деформации свариваемых поверхностей под действием приложенных сжимающих давлений или в процессе их оплавления с последующим самопроизвольным образованием общей сварочной ванны.

Отсюда 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 плёнок (рис.1.4).

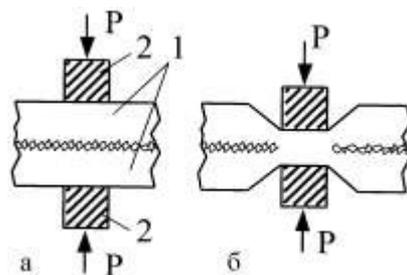


Рис.1.4. Схема холодной сварки пластин: а - исходное состояние; б - после сварки. 1 - свариваемые пластины; 2 - инструмент для передачи давления (пуансоны).

Подогрев свариваемых заготовок облегчает процесс сварки, и соединение происходит при значительно меньшей деформации (рис.1.5).

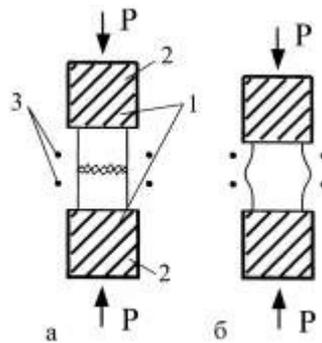


Рис.1.5. Схема сварки давлением с подогревом: а - исходное состояние; б - после сварки. 1 - свариваемые заготовки; 2 - инструмент для передачи давления (пуансоны); 3 - нагреватель (индуктор)

При расплавлении металла в нём сохраняются связи между атомами (ионами). Сохраняются они и на образовавшихся при плавлении кромок межфазных границах: твёрдый металл - жидкий. Поэтому для формирования непрерывной межатомной связи достаточно образования общей сварочной ванны и, как следствие, исчезновения границы между соединяемыми поверхностями (рис.1.6).

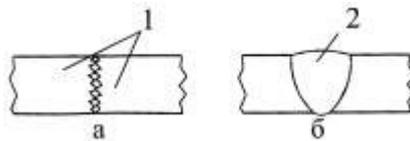


Рис.1.6. Схема образования соединения при сварке плавлением: а - исходное состояние; б - после сварки. 1 - свариваемые заготовки; 2 - сварной шов

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. Если же оксиды тугоплавкие и нерастворимы в жидком металле, то они препятствуют сплавлению металла и образованию общей сварочной ванны (например, при сварке алюминия). В этом случае изыскивают приёмы, обеспечивающие разрушение и удаление оксидов в процессе сварки.

Таким образом, процесс сварки следует рассматривать как совокупность технологических приёмов (расплавление свариваемых поверхностей с образованием сварочной ванны, нагрев и деформация свариваемых заготовок и пр.), направленных на решение задачи установления межатомных связей на границах раздела соединяемых заготовок.

Следует отметить, что образование металлических связей между свариваемыми поверхностями, хотя и является основным и необходимым этапом формирования соединения, всё же ещё не определяет конечные свойства полученных сварных соединений. Последние зависят от целого ряда процессов, сопутствующих образованию межатомных связей - процессов, которые приводят к изменению в зоне сварного соединения микроструктуры, химического и фазового состава, формированию внутренних напряжений и развитию деформаций.

Наибольшие отклонения свойств сварного соединения от свойств основного металла наблюдаются при сварке плавлением, так как в этом случае металл нагревается, во-первых, неравномерно по всему объёму свариваемых заготовок и, во-вторых, до наиболее высокой температуры - температуры плавления.

При сварке давлением также могут происходить изменения фазового состава и микроструктуры свариваемых заготовок, так как 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.1.6) следует ознакомиться с закономерностями:

- изменения химического состава металла шва;
- формирования структуры сварного соединения;
- образования внутренних (сварочных) напряжений, возникающих при неравномерном нагреве и способных вызывать деформации свариваемых конструкций и даже разрушению сварного соединения.

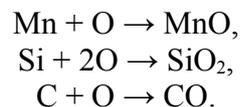
1.2. Особенности формирования химического состава металла шва

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

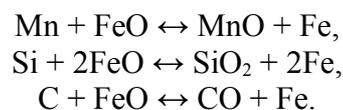
В условиях высокой температуры электрической дуги и металла сварочной ванны происходит диссоциация молекул газов - кислорода, азота, водорода и химических соединений - углекислого газа и паров воды с образованием атомарного кислорода, азота, водорода и углерода, которые становятся весьма активными и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

Так, при сварке сталей кислород, взаимодействуя с железом, образует оксиды FeO, Fe₃O₄, Fe₂O₃. Наиболее опасным для качества шва является оксид FeO, способный растворяться в жидком металле. После остывания шва ввиду невысокой температуры затвердевания FeO остаётся в нём в виде выделений по границам зёрен, что сильно снижает пластичность шва. Чем больше кислорода в шве находится в виде FeO, тем хуже его механические свойства. Высшие оксиды Fe₃O₄ и Fe₂O₃ не растворяются в жидком металле и всплывают на поверхность сварочной ванны в виде шлака.

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



В сварочной ванне легирующие элементы могут окисляться и 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 различных включений или пор (CO), значительно снижающих механические свойства сварных соединений.

Поэтому одним из условий получения качественного металла шва является предупреждение его окисления в первую очередь путём создания различных защитных сред.

Однако применяемые при сварке защитные меры не всегда обеспечивают отсутствие окисления расплавленного металла. В этом случае 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 вредно влияет на его механические свойства, особенно пластичность. Кроме того, насыщение металла азотом способствует образованию газовых пор.

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. Это 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.

1.3. Микроструктура сварного соединения

Сварное соединение (рис.1.7) включает в себя сварной шов 1, образующийся в результате кристаллизации сварочной ванны; зону сплавления 2, в которой металл при нагреве находился в твёрдо-жидком состоянии, и зону термического влияния 3, являющуюся частью основного металла, подвергавшегося тепловому воздействию, вызывающему изменение структуры и свойств.

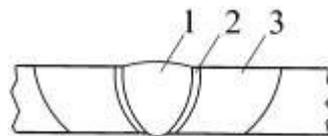


Рис.1.7.Схема строения сварного соединения: 1 - сварной шов;
2 - зона сплавления; 3 - зона термического влияния

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

Первичной кристаллизацией называют переход металла из жидкого состояния в твёрдое, в результате чего образуются кристаллиты (зёрна). Процесс первичной кристаллизации начинается на частично оплавленных зёрнах основного металла, находящихся на дне сварочной ванны. При многослойной сварке центрами кристаллизации являются поверхности кристаллитов 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, то есть с оплавленным зерном основного металла.

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

При зернистой структуре зерна не имеют определённой 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 зёрна вытянуты в одном направлении. В столбчатой структуре они имеют компактную форму, а в дендритной - ветвистую. Такие структуры шов имеет при медленном охлаждении - при сварке под флюсом и электрошлаковой сварке.

Направление роста кристаллов связано с интенсивностью отвода тепла от ванны жидкого металла. Кристаллы растут перпендикулярно границе сплавления в направлении, противоположном отводу теплоты (рис.1.8).

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, имеющего гранецентрированную кубическую решетку, в α -железо, имеющее объемно-центрированную кубическую решетку. Это сопровождается изменением строения металла за счет появления новых образований в пределах первичных столбчатых кристаллитов. Кристаллиты, имеющие структуру аустенита, распадаются, образуя механическую смесь почти чистого α -железа (феррита) и карбида железа Fe_3C (цементита). Такое явление называется вторичной кристаллизацией или перекристаллизацией.

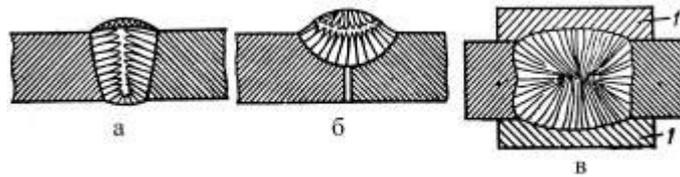


Рис.1.8. Схемы направления роста кристаллитов при кристаллизации шва: а - с глубоким проваром; б - широкого; в - электрошлакового; 1 - медные ползуны

При сварке низкоуглеродистой стали в околошовной зоне различают следующие участки (рис.1.9): сплавления, перегрева, нормализации, неполной перекристаллизации и рекристаллизации. Далее идет основной металл, не подвергавшийся действию высоких температур.

Зона сплавления (участок неполного расплавления) непосредственно примыкает к сварному шву. На этом участке и происходит сварка. Ширина его в зависимости от источника нагрева и режима сварки находится (ориентировочно) в пределах 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 выше механических свойств основного металла, не подвергавшегося нормализации. Ширина участка находится в пределах 1,2 - 4 мм.

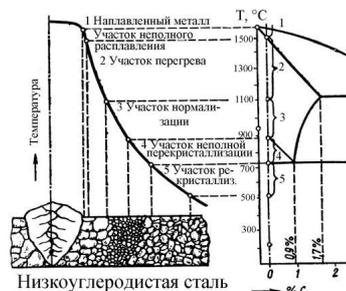


Рис.1.9. Структура околошовной зоны при сварке низкоуглеродистой стали

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, имеются 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, сущность которой состоит в том, что 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.

Вид сварки	Ширина зоны термического влияния, мм
Ручная дуговая	3 - 6
В защитных газах	1 - 3
Под флюсом	2 - 4
Электрошлаковая	11 - 14
Газовая*	20 - 30

* При этом виде сварки ширина зоны термического влияния велика вследствие большой зоны разогрева основного металла.

1.4. Напряжения и деформации при сварке

В процессе изготовления сварных конструкций в них возникают сварочные напряжения и деформации. Сварочные напряжения, превышающие предел текучести металла, вызывают пластическую деформацию последнего, 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, т. е. 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.

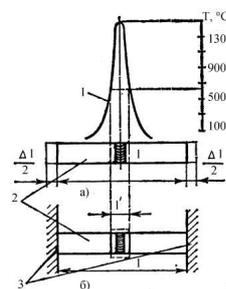


Рис. 1.10. Местный нагрев незакреплённой (а) и закреплённой обоими концами (б) пластин: 1 - кривая распределения температур; 2 - пластины; 3 - жёсткое закрепление

Все металлы при нагревании расширяются, а при охлаждении сжимаются. При наличии жестких связей между нагретыми и холодными участками металла это приводит к образованию сжимающих или растягивающих внутренних сварочных напряжений. Рассмотрим несколько примеров. При местном нагреве пластины, свободно лежащей на сварочном столе, ее длина l увеличится на величину Δl (рис. 1.10, а).

Это увеличение зависит от коэффициента линейного расширения данного металла, длины нагретой зоны, а также температуры ее нагрева. В процессе охлаждения удлинение будет уменьшаться и при

начальной температуре станет равным нулю. После охлаждения пластина приобретает свои первоначальные размеры и в ней не будет ни внутренних напряжений, ни остаточных деформаций. При местном нагреве этой же пластины, жестко закрепленной с обоих концов (рис.1.10,б), она не может свободно удлиняться, поэтому в ней возникнут сжимающие внутренние напряжения. При высокой температуре нагрева (более 600 °С) сжимающие напряжения превзойдут 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.

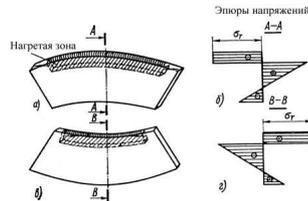


Рис.1.11. Возникновение напряжений и деформаций при наплавке валика на кромку полосы металла: σ_m - напряжение предела текучести

Аналогичным образом возникают внутренние напряжения и деформации при наплавке валика на кромку полосы (рис.1.11, а). Наплавленный валик и нагретая часть полосы будут расширяться и растягивать холодную часть полосы, вызывая в ней растяжение с изгибом. Сам же валик и нагретая часть полосы будут сжаты, поскольку их тепловому расширению препятствует холодная часть полосы. График распределения напряжений будет иметь вид, показанный на рис.1.11, б.

Растягивающие напряжения принято обозначать 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, будут укорачиваться. Этому укорочению снова 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.1.11, в), а остаточные напряжения в ней распределятся, как показано на рис. 1.11, г. В реальных условиях изменение температур от нагретой к холодной зоне полосы происходит плавно, поэтому на графиках распределения температур переход от растягивающих напряжений к сжимающим также будет более плавным, чем показано на рис. 1.11, б и г.

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



Рис.1.12. Направления действия продольных и поперечных внутренних напряжений

При сварке происходят продольная и поперечная усадки расплавленного металла, в результате чего образуются продольные и поперечные внутренние напряжения (рис. 1.12), вызывающие деформации сварных изделий. В результате продольной усадки возникает коробление изделий в продольном

направлении (рис.1.13), а поперечная, как правило, приводит к угловым деформациям, т. е. к короблению в сторону большего объема расплавленного металла (рис.1.14).

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

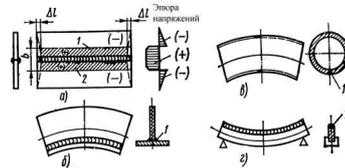


Рис. 1.13. Деформации сварных изделий от продольной усадки наплавленного металла: а - при симметричном расположении шва, б, в - при несимметричном расположении шва, г - при наплавке валика на кромку полосы; 1 - сварной шов, 2 - зона нагрева; Δl - величина деформации от продольной усадки, б - ширина зоны нагрева

Ещё более сложные процессы протекают при сварке разнородных металлов. Основными трудностями, возникающими при этом, могут быть металлургическая несовместимость, то есть различия в структуре, а также различия в коэффициентах линейного расширения, тепло- и электропроводности.

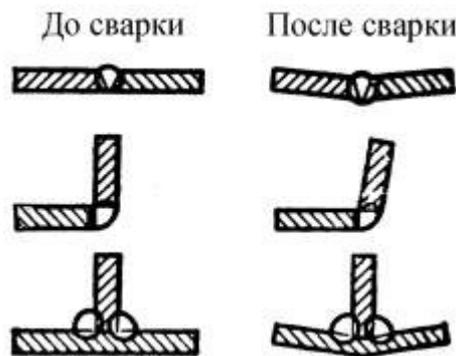


Рис.1.14. Деформации сварных изделий от поперечной усадки наплавленного металла

Представления о механизмах и кинетике процессов, протекающих при сварке, несмотря на достигнутые успехи науки, находятся в стадии непрерывного развития.

Каждому интересно узнать о будущем своей профессии. Будущее начинается сегодня. Но чтобы лучше его понять, надо хорошо знать не только дела наших дней. Историки говорят: лучший ключ к тайнам будущего в - знании прошлого. Поэтому представления о перспективах сварки должны опираться на её историю.

2. ИЗ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ СВАРКИ

2.1. Сварка в древности

Из недр каменного века берут начало многие достижения человечества, в том числе и в области сварочной технологии.

Еще в глубокой древности при помощи каменного орудия из самородков золота, серебра, меди можно было обковывать пластинки, острые лезвия, скребки и т. п., которые для увеличения их размеров соединяли между собой. Нанося удары по сложенным вместе кускам металла, удавалось добиться их соединения. А это был уже один из видов сварки - сварка в холодном состоянии путём

приложения деформирующих усилий. Способ холодной сварки совершенствуется до сих пор и находит эффективное применение в наше время.

За несколько тысячелетий до нашей эры некоторые племена научились добывать из руды медь. Но техникой литья они ещё не овладели и, чтобы изготовить крупное изделие из меди, им приходилось прибегать к сварке отдельных подогретых кусков металла. Подогрев металла до пластического состояния облегчал схватывание, а процесс соединения напоминал ковку. Поэтому он и называется кузнечной сваркой.

Появление нового материала - бронзы заставило древних умельцев приняться за разработку новых методов сварки. Дело в том, что бронза имела более высокую прочность, твёрдость, сопротивление истиранию по сравнению с медью. Однако её пластичность была значительно ниже пластичности меди. Поэтому сварка бронзы методом пластической деформации, даже с подогревом, не обеспечивала образования соединения. Вероятно, древние мастера не раз наблюдали, как перегретые капельки расплавленной бронзы, попадая на бронзовые пластины, иногда прочно "схватывались" с ними. Вот этим свойством - схватываться, привариваться - и воспользовался неизвестный изобретатель литейной сварки, сущность которой заключалась в том, что зазор между соединяемыми заготовками заполнялся расплавленным металлом и деформирование сварного соединения происходило в твердожидком состоянии. Этим способом, вероятно, были изготовлены бронзовые сосуды высотой 310 мм с толщиной стенок всего 0,5...0,7 мм в Древней Греции.

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.2.1), выполненная из весьма чистого железа (99,97% Fe).

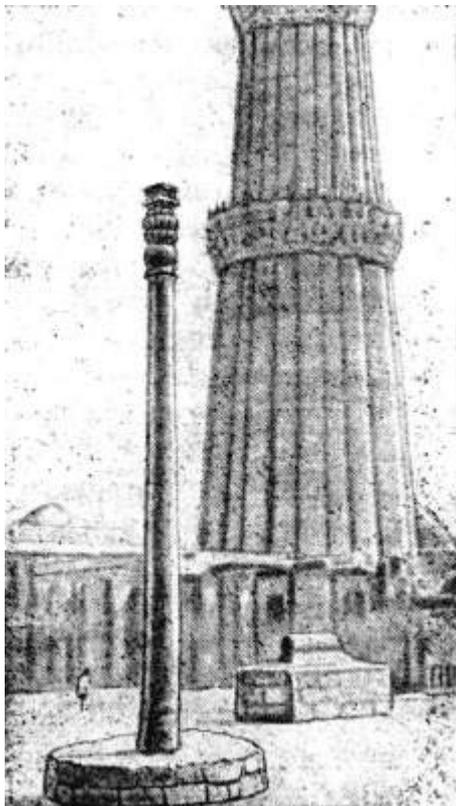


Рис.2.1. Железный "столб счастья" в г. Дели (Индия). По народному поверью, будет счастлив каждый, кто, прислонившись к этому столбу, охватит его руками

Колонна весит около 6,5 тонн, имеет высоту 7,3 м при диаметрах у основания 416 мм, а у верха - 295 мм и относится она к 415 г. н. э. А ведь вплоть до начала XIX века не было известно способов получения температур, достаточных для расплавления железа и литья изделий из него. Горение обыкновенной древесины создаёт температуру 1000...1100 °С, достаточную для плавления меди и её сплавов. Но чтобы выплавить чистое железо, нужна температура порядка 1550 °С. Нет печей и

неизвестны методы создания такой температуры, причём понадобятся тысячелетия, прежде чем появятся технические возможности достижения её.

Одной из гипотез, объясняющей создание этой колонны, является применение кричного метода получения железа с последующей ковкой заготовок (кузнечной сваркой криц) в нагретом состоянии. Сначала в горнах при температурах порядка 1000 °С восстановлением железной руды древесным углем получали крицу, имеющую вид губчатой массы и состоящую из зёрен чистого железа и шлака. А затем крицу неоднократно проковывали в нагретом состоянии. При этом отдельные частицы железа соединялись - сваривались, образуя плотный металл. Такое железо называли сварочным. Для того, чтобы увеличить массу металла, отдельные заготовки разогревали до белого каления, складывали вместе и проковывали. Без кузнечной сварки железный век начаться не мог.

Высокого мастерства достигли кузнецы-сварщики в изготовлении орудий труда и оружия.

Множество железных мечей хранятся в различных музеях мира. Удивительны по своей конструкции мечи I-II вв., найденные на местах бывших римских крепостей, поднятые с затонувших кораблей. Клинки мечей неоднородны по толщине и представляют собой чередующиеся в определённой последовательности слои твёрдой стали и мягкого железа. Такие мечи обладали высокой прочностью и к тому же были самозатачивающимися.

Современными методами металлографии установлено, что один из клинков имел одиннадцать слоёв. Такая работа требовала овладения всеми премудростями кузнечной сварки, огромного опыта, интуиции (о науке говорить было ещё 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 почёте, что, согласно греческой мифологии, им не погнушался заниматься один из олимпийских богов - Гефест, покровитель искусств и ремёсел.

В железном веке использовалась и такая технология получения неразъёмных соединений, как пайка.

Рано или поздно древние ювелиры должны были обнаружить, что для соединения металлов и сплавов методом заливки можно применять такие сплавы, которые плавятся при меньшей температуре, чем основной соединяемый металл. Так, стоило только в золото добавить медь или серебро, как образовывался сплав с меньшей, чем у исходных компонентов, температурой плавления. Спустя тысячи лет металловеды исследуют влияние составов сплавов на температуру их плавления, начертят диаграммы состояния всевозможных комбинаций металлов и, в частности, установят, что сплав 20% золота и 80% меди плавится при температуре 886 °С (тогда как температура плавления технически чистого золота 1064 °С, а меди - 1083 °С), сплав 70% серебра с 30% меди плавится при 780 °С (температура плавления чистого серебра 961 °С). Это свойство сплавов и было использовано для пайки.

Еще в египетских пирамидах археологи неоднократно находили предметы из золота и серебра, спаянные оловом. А в Помпее, погибшей при извержении Везувия, были обнаружены свинцовые водопроводные трубы, спаянные продольным швом.

Многие золотые украшения и предметы быта, найденные в скифских курганах, сделаны с помощью пайки (рис.2.2).

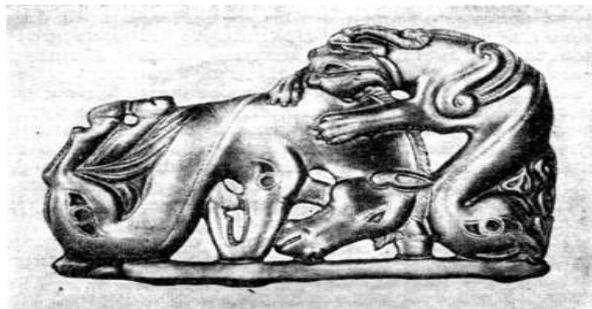


Рис.2.2. Золотая бляха из Сибирской коллекции Петра I

Своей поразительной красотой шедевры древнего искусства обязаны не только таланту художников, но и мастерству умельцев, осуществлявших пайку. Причём на многих изделиях даже невозможно заметить шов.

Кузнецы аланских племён, владевшие технологией кузнечной сварки стали и железа, в VIII...X вв. использовали для пайки деталей из бронзы, серебра и золота легкоплавкие свинцово-оловянистые припои.

Значительного успеха искусство металлообработки достигло в Киевской Руси в IX...XII вв. Уровень производства и обработки был достаточно высоким, чтобы изготавливать прекрасные ювелирные украшения (рис.2.3), вооружение и многочисленные орудия труда. Эти изделия отличались высоким качеством и чистотой сварных швов в местах соединений. Для изготовления мечей, наконечников копий применяли сталь и железо различных сортов. Часто из прочной стали делали только режущую кромку и наваривали на неё кузнечным способом сталь помягче. Кузнецы даже клеймили свои изделия, наваривая на металл буквы и знаки.

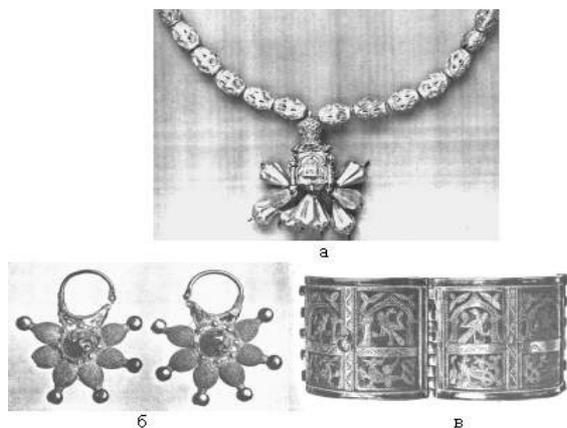


Рис.2.3. Ювелирные украшения: а - ожерелье; б - колты; в - браслет.
XII век, пайка

Развитие производительных сил, подъём экономики на Руси, освободительная борьба русского народа против монголо-татарского ига подняли на новую ступень кузнечно-сварочное дело. В 1382 году против орды хана Тохтамыша использовали ковано-сварные 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 наворачивали ещё один или два листа, следя за тем, чтобы сварные швы не совпадали. Получалась часть ствола. Несколько таких многослойных частей заготовок соединяли между собой. При этом сопрягаемые концы заготовок предварительно отковывали в виде внутреннего или наружного конуса, что позволяло их затем соединить внахлестку кузнечной сваркой (рис.2.4).

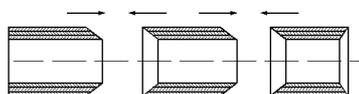


Рис.2.4. Схема элементов ствола пушки, получаемого кузнечной сваркой

В романе "Пётр Первый" выдающимся писателем и знатоком русской истории А.Н. Толстым достаточно точно и ярко описан процесс приварки лапы к шестисоткилограммовому якорю.

Для того, чтобы изготовить крупное изделие (вал, длинную полосу), требовалась крупная заготовка. Такие заготовки получали из пакета мелких листов. Пакет, скреплённый оболочкой, нагревали в печи и проковывали-сваривали, придавая форму бруса. При необходимости несколько таких брусков, в свою очередь, сваривали между собой.

В XIX в. в России расширилось применение электрического привода на промышленных предприятиях, наблюдался подъём транспортного строительства, промышленность владела 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 приходит на смену молот. Крупные детали обжимают гидравлическими прессами. Улучшились конструкции печей для нагрева свариваемых заготовок. Однако во многих отраслях такая сварка сдерживала производство. Она была трудоёмка, малопродуктивна, требовала создания громоздких печей и молотов, но главное - 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 величина его деформации 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 тепла, способного локально расплавить металл. А такого источника тепла в то время не было.

2.2. Рождение и развитие электродуговой сварки

С электрическими явлениями в природе человек познакомился очень давно. Такими явлениями были: гроза; способность янтаря, натёртого шерстью, притягивать мелкие частички различных веществ; с древних времён были известны людям и некоторые свойства природных магнитов и т. д.

В России интерес к электричеству постоянно возрастал со времён Ломоносова. И как только стало известно о создании итальянским физиком А. Вольта нового источника, способного давать электрическую энергию в результате химических реакций, русские исследователи начали работать с электрическим током. В начале 1802 года 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 этой батарее и было суждено стать исторической: на ней была впервые в мире получена электрическая дуга. Её называли вольтовой, по названию источника тока - вольтова столба. Но современники не сумели по достоинству оценить открытие учёного. От открытия В.В. Петрова до технического применения дугового разряда с целью соединения (сварки) и разъединения (резки) металлов прошло около 80 лет. Открытие В.В. Петрова значительно опередило свой век. Надо было появиться на свет новому русскому умельцу-самородку Николаю Николаевичу Бенардосу, который на основании дуги Петрова и достижений мировой электротехники создал принципиально новый способ сварки и резки металлов - электродуговой.

Николай Николаевич Бенардос родился 26 июля (7 августа) 1842 года через восемь лет после смерти профессора В.В. Петрова, в деревне Бенардосовка на Херсонщине (ныне село Мостовое Николаевской области). С ранних лет он проявил интерес к различным ремёслам, особенно к технике. И хотя по настоянию отца, полковника в отставке, ему пришлось поступить на медицинский факультет Киевского университета, до конца он там не доучился и перешёл в

Московскую земледельческую и лесную академию (ныне Тимирязевская сельскохозяйственная академия).

В 1869 году Н.Н. Бенардос поселился в заштатном городке Лух Юрьевского уезда Костромской губернии. Он построил в имении матери механические мастерские и занялся воплощением своих изобретений, испытаниями и усовершенствованием их.

Более 120 оригинальных изобретений сделал Н.Н. Бенардос, 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 колёса 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 количество изобретений сделал он в области электротехники. И самым важным из них, принесших ему мировую славу, явился разработанный им в 1882 г. способ электродуговой сварки, названный электрогефестом. Металл расплавлялся дугой, горящей между угольным электродом, закреплённым в специальном держателе (рис.2.5), и изделием, подключённым к полюсам источника тока.

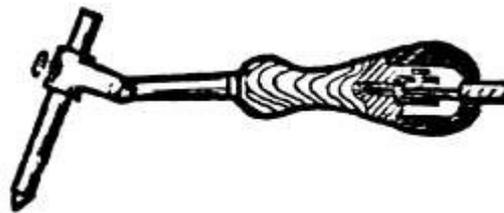


Рис.2.5. Держатель Н.Н. Бенардоса для ручной дуговой сварки угольным электродом

При этом между генератором и дугой подключалась батарея аккумуляторов. Генератор работал непрерывно, заряжая аккумуляторы, и в момент возбуждения дуги между электродом и металлом энергия подавалась в дугу в большом количестве. Однако такой источник питания был, конечно, далёк от совершенства. В результате напряжённого труда к лету 1885 г. Н.Н. Бенардосу удалось полностью, в деталях разработать технологию сварки стали и чугуна и аппаратуру для сварки, успешно провести испытания. В 1885 году 6 июля 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 Н.Н. Бенардосу были выданы патенты во Франции, Бельгии, Великобритании, Германии, Швеции, позже в Италии, США, Австро-Венгрии, Дании и других странах.

В 1886 году в столице России было организовано первое в мире специализированное научно-производственное объединение по электросварке - "Электрогефест". Сам Н.Н. Бенардос был здесь одновременно и учёным-исследователем, и конструктором аппаратуры, и рабочим-сварщиком.

С 1886 года началось практическое применение дуговой сварки в мастерских железных дорог и на других предприятиях не только для ремонта, но и для изготовления различных металлических изделий.

"Электрогефест" успешно применяли и за рубежом. К середине 90-х годов XIX века новый технологический процесс был внедрён 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 Н.Н. Бенардоса ещё только начинал

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

Николай Гаврилович Славянов родился 23 апреля (5 мая) 1854 года в Задонском уезде Воронежской губернии. Окончив с золотой медалью гимназию в Воронеже, он в 1872 году поступил в Петербургский Горный институт. Получив специальность инженера-металлурга в 1877 году, Н.Г. Славянов уехал работать на казённый Воткинский горный завод смотрителем механических фабрик. В 1883 году он был назначен управителем оружейных и механических фабрик Пермских пушечных заводов в Мотовилихе. С 1888 года стал там горным начальником, а с 1891 года и до конца жизни занимал должность горного начальника (директора) Пермских пушечных заводов.

Славянов критически оценил изобретение Бенардоса и 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.

Н.Г. 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.

Н.Г. Славянов разработал специальный сварочный генератор на 1000 А, заменивший аккумуляторную батарею Бенардоса.

К концу 1880-х годов в европейских странах и США быстрыми темпами развивается машиностроение, судостроение, энергетика. Растёт масса стальных отливок. Всё дороже обходится брак: трещины, раковины, поры. Из-за этого массивные детали идут на переплав. Это происходит повсюду, в том числе и в Перми, и Н.Г. Славянов начинает применять свой новый способ для исправления дефектов литья, ремонта деталей паровозов, паровых машин, зубчатых колёс и т. д.

О масштабе решаемых задач в некоторой степени можно судить по сведениям, приведенным в таблице 2.1. Только за три с половиной года на Мотовилихинском заводе было выполнено более 1600 работ по сварке и наплавке ответственных изделий.

Способ Славянова Получил диплом первой степени и золотую медаль на Всемирной выставке в Чикаго в 1893 году за удивительный экспонат из России - металлический двенадцатигранный 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 граммов представлял сразу всю гамму конструкционных металлов того времени.

Большое внимание Н.Г. Славянов уделял механизации и автоматизации дуговой сварки. Он изготовил и опробовал первый в мире сварочный полуавтомат, элементы которого использованы и в современных автоматических сварочных головках. Постоянство длины дуги в определённых пределах оплавления электрода поддерживалось двумя соленоидами, втягивающими железный сердечник и обеспечивающими автоматическую подачу электрода.

Внимание, которое Н.Г. Славянов придавал проблеме автоматического регулирования длины сварочной дуги, свидетельствует о его блестящей технической прозорливости: он предвосхитил применение механизмов для регулирования длины электрической дуги, имеющих большое значение и в современной технике автоматической сварки.

В 1891 году Н.Г. Славянов запатентовал своё изобретение во Франции, Германии, Великобритании, Австро-Венгрии, Бельгии, а в 1897 году - в США.

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

В то же время необходимо отметить, что новый 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. Сварку поддерживали только отдельные энтузиасты. Удачно найденные решения внедрялись в практику, развивались, служили очередной ступенькой для дальнейшего подъёма сварочного производства.

№	Наименование работ	Материалы	Средства	Сила тока	Напряжение	Время	Примечания
№ 1
№ 2
№ 3
№ 4

Таблица 2.1 Выписка из "Ведомости о работах, произведённых с помощью электрической отливки горного инж. Славянова в Пермских Пушечных заводах"

Среди таких ступеней была и идея шведского инженера О. Кельберга. Он предложил покрывать металлические плавящиеся электроды термостойкими неэлектропроводными материалами. И хотя тугоплавкое покрытие нужно было Кельбергу, чтобы выполнить сварку в потолочном положении (предотвратить стекание электродного металла), оказалось, что оно в некоторой степени защищает расплавленный металл от кислорода и азота воздуха. В 1917 году американские учёные О. Андрус и Д. Стреса изобрели новый электрод. Их стальной стержень был обёрнут полосой бумаги, приклеенной силикатом натрия - жидким стеклом. Бумага стала источником дыма, оттеснявшего воздух из зоны сварки. Обнаружилось ещё одно интересное свойство новой обмазки - дуга возбуждалась сразу, с первого касания и не гасла, как обычно, при незначительном удлинении. Сказалось присутствие в обмазке натрия.

Совместными усилиями изобретателей многих стран велись исследования с целью улучшения качества металла шва. И к концу 20-х годов прошлого века электроды с обмазкой уже содержали специальные газообразующие вещества, оттесняющие воздух из зоны сварки; легирующие вещества, которые улучшали состав и структуру металла шва; шлакообразующие компоненты, которые защищали расплавленный и кристаллизующийся металл от взаимодействия с воздухом; и, наконец, стабилизирующие вещества с низким потенциалом ионизации. Изменяя состав компонентов покрытия, можно было получать электроды со специальными свойствами.

Первые крупные сварочные работы в России возобновились и были выполнены под руководством В.П. Вологодина. На Дальзаводе (судоремонтный завод) он организовал в 1920 году сварочный участок, на котором ремонтировали детали и узлы судов, изготавливали паровые котлы, буксирные катера. На станции Большой Невер по проекту Вологодина впервые был построен сварной резервуар для хранения нефтепродуктов, начали строить сварные суда (первым было судно "Седов"), крупные доки, морские траулеры и т. п.

В 1923 году на принципе намагничивающей параллельной и размагничивающей последовательной обмоток возбуждения В.П. Никитиным, К.К. Хреновым и А.А. Алексеевым были разработаны генераторы СМ-1, СМ-2, СМ-3 (рис.2.6).

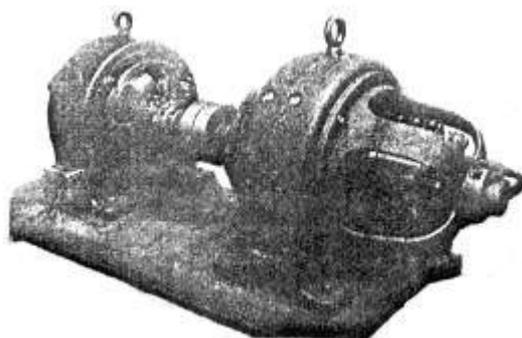


Рис.2.6. Электросварочный агрегат с генератором СМ-2

В 1924 году В.П.Никитин разработал сварочный трансформатор СТН.

Для небольших сварочных токов Никитиным был сконструирован трансформатор с внутренним реактивным сопротивлением (рис.2.7), представляющий собой комбинацию трансформатора и реактивной катушки.

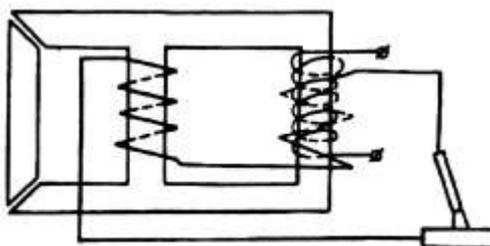


Рис.2.7. Схема трансформатора Никитина

К концу 30-х годов были сформулированы три принципа регулирования тока в сварочных трансформаторах: с несколькими выводами (рис.2.8,а), с магнитным шунтом (рис.2.8,б) и с регулируемым воздушным зазором (рис.2.8,в); каждая из схем имеет несколько отличающихся статических вольт-амперных характеристик.

Выпуск этого оборудования стал производиться серийно на заводе "Электрик" (г. Санкт-Петербург).

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

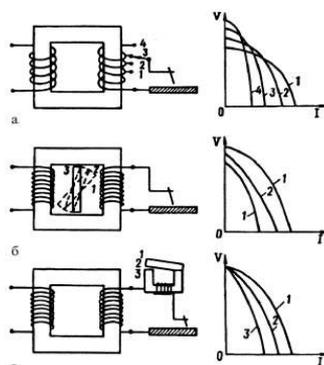


Рис.2.8. Схемы трансформаторов с различными системами регулирования и соответствующие вольт-амперные характеристики

С началом индустриализации нашей страны роль электросварки проявилась в полном объёме. Без неё не удалось бы невиданными темпами построить Магнитку, Кузнецк, Днепрогэс. В эти годы учёный, специалист в области мостостроения академик Евгений Оскарлович Патон сумел оценить

всё, что может дать сварка. Он организовал в Киеве при Академии наук УССР лабораторию, поставившую перед собой ясную и чёткую цель широкого применения электросварки вместо клёпки в самых различных отраслях промышленности. В январе 1934 года на базе этой электросварочной лаборатории был создан Институт электросварки, который в настоящее время носит имя его организатора - Е.О. Патона.

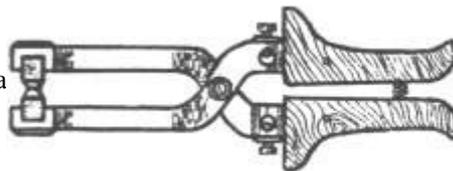
В тридцатые годы прошлого века ручная дуговая сварка покрытыми электродами внедрялась в производство металлоконструкций. Котлы и корабли, каркасы зданий и детали мостов, автомобили и вагоны и пр. - диапазон сварных конструкций пополнялся и, казалось, ничто уже не превратит наступление сварки. Но в 1938-1939 годах в Западной Европе неожиданно обрушилось несколько мостов. Балки мостов были сварными. В этот период тысячи железнодорожных вагонов в России и других странах были сняты с эксплуатации из-за трещин в сварных рамах и тележках. Начались всесторонние исследования по влиянию процесса сварки на свойства металла шва и околошовной зоны, которые позволили найти способы управлять качеством сварного соединения.

В период с 1934 по 1941 год под руководством Е.О. Патона и при его непосредственном участии был выполнен цикл исследований в области проблем прочности сварных конструкций, их расчёта и надёжности. В результате систематических работ по изучению металлургических и электротехнических процессов дуговой сварки был разработан способ сварки под флюсом. Дальнейшие работы по сварке, выполненные в Институте электросварки им. Е.О. Патона, принесли институту всемирную известность.

2.3. Разработка процесса контактной электросварки

Независимо от изобретателей на Западе Н.Н. Бенардос предложил технологию точечной контактной электросварки - второго из самых распространённых в настоящее время способов сварки металлов. Сущность этого способа заключалась в том, что к двум стальным пластинам, помещённым друг на друга, подводился ток с помощью специальных клещей (рис.2.9), в которые были вставлены угольные электроды. Ток проходил через электроды, между которыми зажимались пластины, и выделившейся теплоты было достаточно для образования сварной точки.

Рис.2.9. Клещи Бенардоса для контактной сварки



Слава изобретателя стыковой контактной сварки закрепилась за выдающимся американским изобретателем Эльхью Томсоном, который в 1870 году, когда ему было только 17 лет, начал преподавать химию и механику в Центральной высшей школе в Филадельфии, а через несколько лет уже читал лекции во Франклиновском институте. Одной из проблем в конце XIX века было соединение телеграфных проводов. Эта проблема была решена с помощью стыковой контактной сварки.

К 1884 году Э.Томсоном были созданы необходимые для контактной стыковой сварки элементы оборудования: коммутирующая аппаратура, динамо-машина для генерирования переменного тока, подаваемого на трансформатор большой удельной мощности, специальные токоподводящие зажимы. В 1885 году он отработывает технику сварки, доводит до безотказной работы сварочную аппаратуру и в начале 1886 года подаёт заявку на патент, защищающий принципиально новый способ электрической сварки.

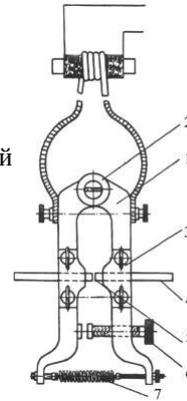
Способ Томсона описывается так: "свариваемые предметы приводятся в соприкосновение местами, которые должны быть сварены, и через них пропускается ток громадной силы - до 200000 ампер при низком напряжении - 1-2 вольт. Место соприкосновения представит току наибольшее сопротивление и потому сильно нагреется. Если в этот момент начать сжимать свариваемые части и проковывать место сварки, то после охлаждения предметы окажутся хорошо сваренными" (Патент США №

347140 от 10 августа 1886 г.) Проковка была не просто данью моде, не остатком прежней технологии, а являлась приёмом, обеспечивающим повышение качества металла шва.

Поскольку кроме нагрева применялось и механическое сдавливание, первоначально способ называли "электрической ковкой" или "безогненным методом сварки".

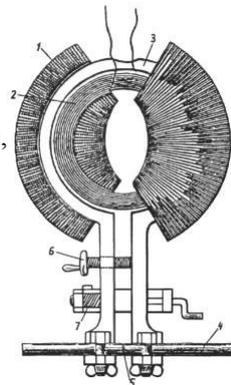
Первое устройство, выполняющее нагрев и сжатие двух проводов, состояло из двух рычагов, на одном конце соединённых шарниром из изоляционного материала, а с другого конца связанных пружиной через изоляционные втулки (рис.2.10). В этих рычагах посередине зажимаются свариваемые детали - провода, стержни и т. п.

Рис.2.10. Схема первой установки для контактной сварки: 1 - рычаги; 2 - шарнир; 3 - зажим; 4 - свариваемые детали; 5 - стык; 6 - стопорный винт; 7 - пружина



В следующей установке был использован трансформатор с замкнутым контуром (рис.2.11). На его первичную обмотку 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 12000 А при напряжении 1 В.

Рис.2.11. Схема установки для контактной сварки, снабжённой трансформатором с замкнутым контуром: 1 - первичная обмотка; 2 - сердечник; 3 - виток вторичной обмотки; 4 - свариваемые детали; 5 - стык; 6 - стопорный винт; 7 - пружина.



Э. Томсон сконструировал установку, в которой ток прерывался синхронно с прикладываемым усилием сжатия. Для развития больших усилий сжатия изобретатель разработал аппарат с гидравлической системой (следует напомнить, что механические и гидравлические системы широко применялись ещё в древних цивилизациях - китайской, вавилонской, египетской, греческой). Следующим шагом в развитии стыковой контактной сварки было применение импульсов тока и давления.

По мере расширения сферы применения стыковой сварки совершенствовалась её технология и разрабатывались новые схемы нагрева. Были предложены несколько способов комбинированной (дуговой и контактной) сварки.

Ч.А. Коффин применил сварку стержней большого сечения с предварительным нагревом вибрирующей короткой дугой. Им же была разработана технология 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, а ток подводился к концам деталей через угольные контакты. Пластины выбирали из материала с большим удельным электросопротивлением, чем у свариваемого металла, благодаря чему ускорялся нагрев. Перед сжатием вставку удаляли. Коффин предложил

также пропускать магнитное поле через свариваемый участок, считая, что это вызовет структурные изменения, приводящие к уменьшению проводимости свариваемого металла, а, следовательно, к ускорению нагрева.

Установки для контактной стыковой сварки часто называли "электрическими горнами". В 1892 году Э. Райс использовал принцип контактной сварки в "кузнечном горне для ювелиров". Он предложил пластины, к которым нужно было приварить орнамент из проволоки, помещать на металлическую плиту, подводя к ней ток от вторичной обмотки сварочной машины.

К началу XX века относятся сообщения об использовании фирмой "Фиат" контактной сварки для изготовления самолётных двигателей.

В 1928 г. фирма "Стаут метл эйрплэйн" (отделение фирмы "Форд мотор") использовала контактную сварку на линиях изготовления конструкций из дуралюмина. В начале 1930-х гг. в Америке была проведена серия статических и усталостных испытаний на образцах, а затем и на натуральных моделях с целью определения возможностей применения контактной сварки конструкций из легких сплавов. Были разработаны технология и оборудование, которые приняли в производстве фирмы "Дуглас", "Боинг" и "Сикорски". В 1935 г. в США был изготовлен монолитный цельносварной балочный фюзеляж.

В то же время необходимо отметить, что конец XIX века и первые десятилетия XX века не были годами широкого распространения электротехнологии. Время торжества электросварки ещё не наступило, потому что электрическая энергия оставалась дефицитной, известные способы сварки не были достаточно универсальными и мобильными, а удовлетворительное качество переплавленного металла обеспечивалось ценой высокой трудоёмкости. Но без сварки уже нельзя было обойтись, и в начале XX века родился ещё один способ, причём не только соединения металлов, но и быстрого эффективного разъединения, основанный не использовании теплоты химических реакций.

2.4. Разработка процесса газовой сварки

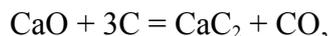
Попытки использовать горючие газы для сварки металлов плавлением (безковки), вероятно, делались многократно. Но необходимые для этого температура пламени и концентрация теплоты достигаются только при сжигании горючих газов (или паров горючих жидкостей) в смеси с кислородом. Поэтому газовая сварка не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

Одновременно с поиском газов велась работа и по созданию надёжной аппаратуры для сварки. В первую очередь необходимо было сконструировать горелку, обеспечивающую хорошее смешение горючего газа с кислородом, высокую концентрацию теплоты на выходе из сопла и взрывобезопасность (ацетилен в 1870 году считался хорошим взрывчатым газом, что подтвердилось несколькими катастрофическими взрывами). Одной из первых (1847 год) заслуживающих внимания конструкций была горелка американского изобретателя Р. Хейра для получения водородно-кислородного пламени.

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

Тем временем в поле зрения техников попадает ацетилен - газ, теплота сгорания которого в несколько раз больше теплоты сгорания водорода, а температура пламени в смеси с кислородом достигает 3200 °С.

Ещё в 1836 году ацетилен получали из карбида кальция, разлагавшегося в воде. Но в то время карбид кальция был дорогим химическим соединением, получаемым в лабораторных условиях. И только в 1892 году, когда был разработан процесс электрической выплавки карбида кальция при взаимодействии негашеной извести с коксом:



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

В 1895 году французский исследователь Анри Ле Шателье отметил, что кислородно-ацетиленовое пламя имеет не только 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. При горении образовывался твёрдый плотный нагар углерода, засорявший газовый канал. Французский инженер Ш. Пикап рискнул смешать оба газа прямо в горелке, до выхода из мундштука, подобно тому, как это делал Девиль с кислородом и водородом. Такая конструкция требовала подачи ацетилена под давлением, и горелки работали, когда газ подавался из баллонов.

При транспортировке сжиженного ацетилена в баллонах зачастую происходили взрывы, и это 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.

Теперь для широкого промышленного применения газовой сварки необходимо было найти способ получения дешёвого кислорода. И с этой проблемой справился немецкий физик и инженер К. Линде. В 1885 году он сконструировал и построил первую в мире промышленную установку для получения жидкого воздуха и в 1902 году создал ректификационный аппарат для разделения воздуха на компоненты. Это открыло дорогу широкому применению кислорода в технике.

Таким образом, к началу XX столетия трудами многих учёных и изобретателей был создан ещё один способ сварки металлов. Ацетилено-кислородная сварка не нуждалась в электрической энергии (правда, для получения карбида кальция и кислорода требовалось электричество); газосварочные установки были автономны, подвижны, несложны в эксплуатации. Серьёзным преимуществом этого способа по сравнению со способами Бенардоса и Славянова была возможность 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 году. Она применялась для исправления брака литья, для изготовления неотчетливых деталей машин, при ремонте изделий из низкоуглеродистой стали, меди и чугуна, в железнодорожных мастерских.

К началу 20-х годов XX века в сварочном производстве преобладала газовая сварка. Работало несколько заводов по производству кислорода. Газовая сварка была применена для сооружения магистральных нефтепроводов в 1926-1935 годах. В 1926 году 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 сварки. И тут оказалось, что у газовой сварки почти нет резерва, что из неё больше нечего "выжать"; ни мощность, ни концентрация пламени не желали повышаться. А при дуговой сварке проблема увеличения скорости решалась путём увеличения силы тока дуги (разумеется, до определённого предела). Но пластичность металла шва, полученного дуговой сваркой, была низкой, что зачастую сводило на нет все преимущества данного метода.

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 поступающим кислородом и ацетиленом. Схема ацетилено-кислородной горелки с двойной регулировкой поступающих газов, а также комплект газосварщика и общий вид передвижного газосварочного поста приведены на рис.2.12.

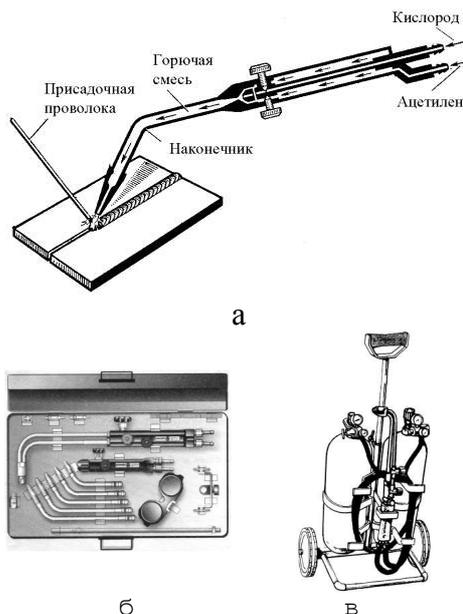
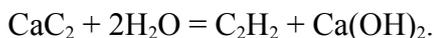
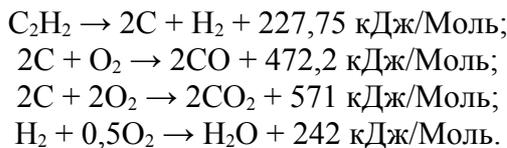


Рис.2.12. Ацетилено-кислородная газовая сварка:
а - схема газовой сварки; б - комплект газосварщика;
в - передвижной пост газовой сварки

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



Молекула ацетилена представляет C_2H_2 собой эндотермическое соединение, т. е. соединение, требующее для своего образования затраты тепловой энергии: 227,75 кДж/Моль. При сгорании ацетилена та теплота, которая пошла на его образование, выделяется и, кроме того, выделяется 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 объёму) 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 путём 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, и штуцер для редуктора у этих баллонов имеет правую резьбу, для того, чтобы его нельзя было перепутать 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.2.13) состоит из трёх зон: ядра - 1, восстановительной (средней) зоны - 2 и факела - 3. В первой зоне происходит пирогенное разложение ацетилена в присутствии кислорода на углерод и водород; во второй - сгорание углерода в кислороде, поступающем из горелки; в третьей - дальнейшее окисление продуктов реакций горения и разложения (СО и Н₂) кислородом, подсасываемым из окружающей среды. Максимальная температура развивается в средней зоне, в которой и располагают свариваемый металл (рис.2.13).

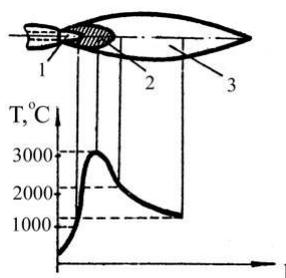


Рис.2.13. Строение газового пламени и распределение температуры по его длине

Если объём поступающего в горелку кислорода будет равен объёму поступающего ацетилена, 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, оно сохраняет свои восстановительные свойства даже при некотором избытке кислорода.

Если объём кислорода меньше, чем объём ацетилена, то при сгорании ацетилена останутся свободные атомы углерода, которые будут повышать содержание углерода в поверхностных слоях металла (науглероживать его). Эти иногда пользуются, чтобы упрочнить поверхностные слои изделия.

Если пламя содержит избыток кислорода, то оно сильно окисляет металл, и такое пламя применяют обычно только для подогрева металла.

В настоящее время газовую сварку применяют для соединения стальных деталей и узлов небольших толщин. Её можно применять 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 другими более прогрессивными способами сварки.

2.5. Сварка в годы Второй Мировой войны

Подготовка к войне и сама война дали толчок развитию сварки, как новой, перспективной технологии во многих странах мира.

В довоенные годы в Германии в сварке увидели средство обойти ограничения по водоизмещению боевых кораблей, установленные Версальским договором. Не превышая разрешенных 10000 тонн, конструкторы сумели разместить на крейсерах мощное вооружение благодаря тому, что вес сварного корпуса стал на 15% меньше клёпаного. Возросли темпы строительства кораблей. Корпуса линкоров, подводных лодок стали изготавливать с помощью ручной дуговой сварки. Бронированные плиты бортов, палуб, башен и рубок сваривали хромоникельмолибденовыми электродами.

Массовое производство самолётов-снарядов "Фау-1" (рис.2.14) стало возможным благодаря применению сварки, с помощью которой изготавливались шарообразные баллоны для сжатого воздуха, необходимого для работы двигателя.

Толчком к развитию сварных конструкций в Великобритании 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 уже располагала цельносварными кораблями.

С началом войны стало ясно, что техника в этой войне должна сыграть решающую роль. Повсеместно вырос спрос на сварку. Компании, занимающиеся сваркой, лаборатории вузов и секции сварочных обществ начали переключаться на решение проблем, которые возникали в связи с освоением и увеличением выпуска вооружений. Работы велись по двум направлениям: совершенствование известных технологий сварки и поиск новых. Целью первого направления было ускорение производства и по-вышение качества вооружения из броневой стали, а второго - разработка новых способов сварки.

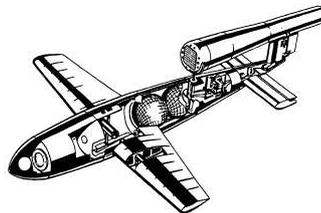


Рис.2.14. Конструкция "летающей бомбы" "Фау-1"

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.2.15). Корпус танка собирается из катаных броневых плит толщиной от 45 до 120 мм. Эти плиты необходимо соединить в прочную конструкцию. Поэтому инженеру-сварщику приходится рассматривать танк как сооружение, изготавливаемое не только путём получения угловых и стыковых соединений в различных пространственных положениях, но ещё и как сооружение, изготавливаемое из трудносвариваемого материала.

Суровые условия войны требовали десятков тысяч танков. Препятствием к увеличению выпуска танков стали бронекорпуса, которые необходимо было сваривать. Чтобы выполнить эту работу ручной дуговой сваркой, нужны были сотни, тысячи высококвалифицированных сварщиков. А вместе с тем даже в мирное время опытных сварщиков не хватало. Подготовить в кратчайший срок необходимое количество специалистов было невозможно. Из создавшегося положения был только один выход - автоматизация процесса сварки.

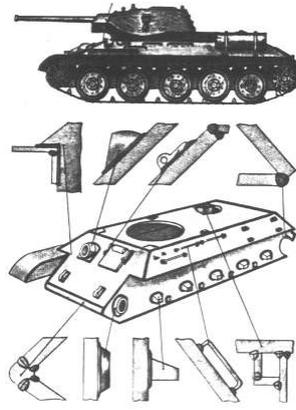


Рис.2.15. Танк - сложная сварная конструкция

В это трудное время академик Е.О. Патон начал разработку технологии автоматической сварки брони под флюсом. И 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 пяти метров квалифицированный сварщик работал около 20 часов. Автоматом неквалифицированный рабочий после 5 - 10 дней обучения мог сварить этот шов за 2 часа. Сектор погона башни вместо пятичасовой сварки вручную автомат сваривал за 49 минут и т. д.

За выдающиеся достижения, ускоряющие производство танков и металлоконструкций, Е.О. Патону было присвоено звание Героя Социалистического Труда, десять сотрудников института были награждены орденами и медалями.

Большую работу по внедрению скоростной автоматической сварки под флюсом выполнил отдел сварки Центрального научно-исследовательского института технологии машиностроения (ЦНИИТМАШ). Разработанный здесь флюс ОСЦ-45 хорошо зарекомендовал себя при сварке малоуглеродистых сталей, из которых изготавливали боеприпасы (бомбы, снаряды и т. п.). Здесь же была спроектирована и изготовлена установка для контактной сварки рельсов в условиях работы с подвижной платформы. С помощью этой установки, размещённой на рельсосварочном поезде, было сварено за один 1942 год более 30 тысяч стыков.

Г.С. Шпагин разработал пистолет-пулемёт (ППШ) с широким применением штампосварных конструкций, что значительно упрощало производство стрелкового оружия. В годы войны сварочные процессы стали широко применяться и при изготовлении авиационной техники: подмоторных рам боевых самолётов, сварных алюминиевых баков и т. п.

С честью выполнили сварщики Ленинграда важное задание Государственного комитета Обороны по скоростному строительству барж для "дороги жизни". Было изготовлено 14 сварных барж общим водоизмещением 12 тысяч тонн.

В годы войны возникла насущная проблема в подводной сварке и резке металлов при ремонте кораблей, мостов, при аварийных и спасательных работах. В декабре 1942 года был сформирован специальный поезд для подводной резки, состоящий из электростанции, водолазных станций, сварочных агрегатов, подъёмных и плавательных средств и т. д.

Характерно, что в годы войны впервые сварка стала применяться практически без ограничений. Так, в 1944 году были спроектированы цельносварные доменные печи, башни и мачты высотой 180 - 200 м и другие ответственные сооружения.

Война открыла широкую дорогу сварке в энергетику. В каждом котельном агрегате тепловой электростанции довоенной постройки имелось по три-четыре барабана - огромных цилиндрических

емкости со сферическими днищами. Изготовление этой сложной и ответственной конструкции требовало специального мощного кузнечно-штамповочного оборудования, причём на какие-либо виды сварки или подварки был наложен строжайший запрет - взрыв котла грозил разрушением всей электростанции.

Во время войны при отступлении электростанции выводились из строя взрывом сферической части барабана. Замена барабана для запуска электростанции означала сборку нового котельного агрегата.

В 1943 году после освобождения оккупированных территорий было принято рискованное по тем временам решение - "отремонтировать барабаны сваркой". Предлагалось: вырезать повреждённые участки; из одного барабана сделать заплатки; вварить заплатки в остальные три барабана.

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

В начальный период войны Америка сохраняла нейтралитет. В её портах было интернировано большое количество немецких торговых судов. Но как только она вступила в войну, на всех немецких судах почти одновременно прогрехотали 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 восстановления их потребуется не менее двух-трёх лет.

И тогда морское министерство предложило для ремонта судов применить электродуговую сварку. Через полгода все немецкие корабли под флагом США вышли в море.

С 1940 по 1942 год объём сварочного производства в США возрос в три раза, в основном за счёт ручной дуговой сварки электродами с качественными покрытиями и автоматической сварки голой проволокой под флюсом.

В США, стране значительно удалённой от фронтов, большое внимание уделялось строительству морского транспорта. Была разработана программа, по которой тоннаж флота к 1946 году должен был увеличиться более чем в 2,5 раза. Не последняя роль в ускорении строительства отводилась сварке "преимущественно электродуговой", почти полностью заменившей клёпку. Только за 1942 год, благодаря замене клёпаной конструкции и технологии клёпки на сварную конструкцию и сварку судов было сэкономлено 500 тыс. тонн стали. Цикл постройки сократился до 50 дней. На верфи "Ричмонд Ярд" (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.2.16). Каждая секция сваривалась из отдельных листов и элементов набора, что позволяло изготавливать судно на поточной линии в цехе одновременно на нескольких участках. Для сварки листов обшивки, толщина которых достигала 20 мм, применялась дуговая автоматическая сварка под слоем флюса. Для уменьшения деформаций применялась многослойная обратно-ступенчатая сварка.

Сварка применялась и в строительстве американских подводных лодок. В судостроении США впервые был применен 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 вертолётов и самолётов. Так, фюзеляж истребителя "Вэлиент" собирали из 410 частей: 110 отрезков хромомолибденовых трубок, 295 уголков, кронштейнов и фитингов из хромомолибденовых листов и т. д. Для ускорения процесса изготовления самолёта было предложено увеличить диаметр

применяемых электродов, создать поточную линию с кантователями и упростить конструкцию фюзеляжа.

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

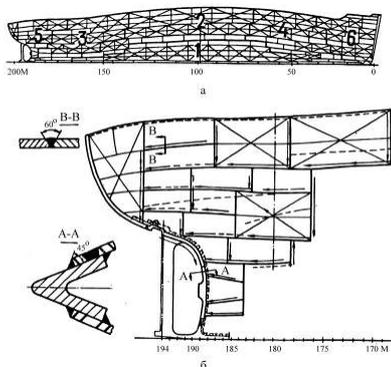


Рис.2.16. Схема сборки и сварки корпуса судна; цифрами обозначена последовательность сборки корпуса из объёмных секций, выделенных утолщёнными линиями; стрелками показано направление сварки

Сварка сыграла большую роль в производстве и другой военной техники и боеприпасов. Не обошлись без сварки при изготовлении первых атомных бомб. 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.

3. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ СВАРКИ СЕГОДНЯ

В соответствии с **ГОСТ 2601-84** по технологическому признаку сварка - это процесс получения неразъёмных соединений посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями при их местном нагреве или пластическом деформировании, или совместном действии того и другого.

3.1. Классификация видов сварки

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

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

Методы сварки плавлением получили широкое распространение благодаря их следующим преимуществам:

- возможность сварки в монтажных и цеховых условиях;
- разнообразие применяемых типов соединений;

- широкие возможности сварки конструкций различных габаритов;
- большой диапазон свариваемых толщин металла - от нескольких микрон, 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.

Сварка плавлением, однако, имеет ряд недостатков:

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

Методы сварки давлением менее универсальны, чем сварки плавлением, но могут иметь в ряде случаев преимущества.

Применение сварки давлением значительно расширило диапазон свариваемых материалов, в том числе разнородных металлов, а также неметаллических материалов, исключило возникновение при сварке трещин, пористости, способствовало уменьшению деформации сварных узлов. Важным является тот факт, что сварка давлением вызывает менее значительные изменения свойств основного металла, чем сварка плавлением.

Методы сварки давлением легко поддаются механизации и автоматизации, характеризуются высокой производительностью.

В зависимости от вида энергии, используемой для образования сварного соединения, все виды сварки разделяют на три класса: термический, термомеханический и механический.

К *термическому* классу относятся виды сварки, осуществляемые плавлением свариваемых поверхностей с использованием тепловой энергии. К этому классу относят такие виды сварки как дуговая, плазменная, электрошлаковая, электронно-лучевая, лазерная и др.

К *термомеханическому* классу относятся виды сварки, осуществляемые с использованием тепловой энергии и давления: контактная сварка, диффузионная сварка и др.

К *механическому* классу относятся виды сварки, осуществляемые с использованием механической энергии и давления: холодная сварка, сварка трением, ультразвуковая сварка и др.

Существуют и другие виды классификации способов сварки.

Способы сварки плавлением можно классифицировать по:

- характеру защиты свариваемого металла и сварочной ванны от окружающей атмосферы (с газовой, шлаковой, газошлаковой защитой);
- степени автоматизации процесса сварки (ручная, механизированная и автоматическая);
- особенностям введения теплоты (с непрерывным нагревом и импульсивным).

В настоящее время существует более 150 способов сварки, но наибольшее распространение получили способы сварки плавлением с использованием электрической дуги. Большинство конструкций, приведенных на рис.1-7, изготовлены электродуговой сваркой.

3.2. Электрическая дуговая сварка

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 тепло в небольшом объёме, что позволяет обеспечить концентрированный ввод тепла в изделие. Из применяемых в настоящее время источников сварочного тепла по плотности энергии, выделяемой в пятне нагрева, электрическая дуга занимает третье место (после лазерных и электронных лучей). При этом максимальная плотность энергии в пятне дуги составляет 105 Вт/см^2 , а минимальная площадь нагрева - $10 - 3 \text{ см}^2$.

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

- *сварка плавящимся (металлическим) электродом дугой прямого действия* (горящей между электродом и заготовкой) с одновременным расплавлением основного металла и электрода, который пополняет сварочную ванну жидким металлом;
- *сварка неплавящимся (графитовым или вольфрамовым) электродом дугой прямого действия*, при которой соединение выполняется путём расплавления только основного металла или с применением присадочного металла;
- *сварка косвенной дугой*, горящей между двумя, как правило, неплавящимися электродами; в этом случае заготовка не включена в электрическую цепь, и для её расплавления используется теплота, выделяемая при соприкосновении свариваемой поверхности со столбом (плазмой) дуги, и теплота, получаемая за счёт излучения и конвекции; такая дуга применяется в случаях, когда требуется ограниченная теплопередача от дуги к изделию (наплавка, напыление);
- *сварка трёхфазной дугой*, при которой дуга горит между двумя электродами (дуга косвенного действия), а также между каждым электродом и основным металлом (дуги прямого действия).

Питание дуги осуществляется *постоянным* или *переменным* током. При применении постоянного тока различают сварку на *прямой* и *обратной* полярности. В первом случае электрод подключают к отрицательному полюсу (катод), во втором - к положительному (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*) и степени механизации процесса (*ручная, полуавтоматическая и автоматическая*). Электродуговой сваркой выполняют стыковые, угловые, тавровые, нахлесточные и торцовые соединения (рис.3.1).

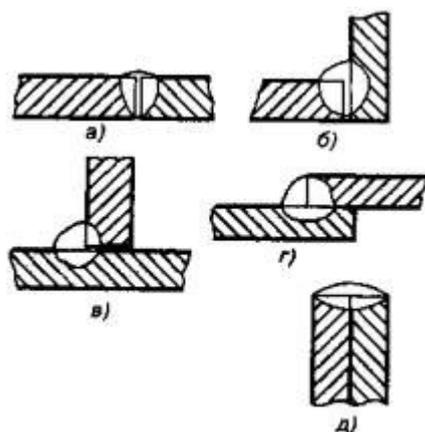


Рис.3.1. Типы сварных соединений

Стыковое соединение представляет собой сварное соединение двух деталей, расположенных в одной плоскости и примыкающих друг к другу торцовыми поверхностями (рис.3.1, а). Оно наиболее распространено в сварных конструкциях, поскольку имеет ряд преимуществ перед другими видами соединений. Условные обозначения стыковых соединений: С1-С48.

Угловое соединение представляет собой сварное соединение двух элементов, расположенных под углом друг к другу и сваренных в месте приложения их кромок (рис. 3.1, б). Условные обозначения угловых соединений: У1 - У10.

Тавровое соединение - это соединение, в котором к боковой поверхности одного элемента примыкает под углом и приварен торцом другой элемент. Как правило, угол между элементами прямой (рис. 3.1, в). Условные обозначения тавровых соединений: Т1-Т8.

Нахлесточное соединение представляет собой сварное соединение, в котором соединяемые элементы расположены параллельно и частично перекрывают друг друга (рис.3.1, г). Условные обозначения: Н1 - Н9.

Торцовое соединение - это соединение, в котором боковые поверхности элементов примыкают друг к другу (рис. 3.1, д). Условных обозначений в стандарте пока нет.

3.2.1. Электрическая дуга и её 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 электропроводностью. Это объясняется малой концентрацией свободных электронов и ионов. Поэтому для того, чтобы вызвать в воздухе или в газе мощный электрический ток, то есть электрическую дугу, необходимо ионизировать воздушный промежуток (или другую газовую среду) между электродами.

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

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

При высоких температурах значительная часть молекул газа обладает достаточной энергией 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, путём введения в зону горения дуги веществ, обладающих низким потенциалом ионизации. К таким веществам относят: калий, натрий, барий, литий, алюминий и др.

Таким образом, электропроводность воздушного промежутка между электродами, а отсюда и устойчивость горения дуги, обеспечиваются эмиссией катода и объёмной 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.

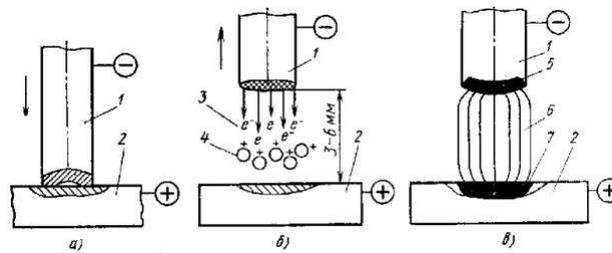


Рис.3.2. Схема процесса зажигания дуги

Короткое замыкание (рис. 3.2, а) выполняется для разогрева торца электрода 1 и заготовки 2. Высокая плотность тока способствует оплавлению микровыступов в контакте и образованию плёнки жидкого металла. При последующем отводе электрода плёнка жидкого металла растягивается, а её сечение уменьшается, вследствие чего возрастает плотность тока и повышается температура металла. Это приводит к разрыву плёнки и испарению металла. При этом интенсивная эмиссия 3 обеспечивает ионизацию паров металла и газов 4 межэлектродного промежутка (рис. 3.2, б). По мере разогрева столба дуги и повышения кинетической энергии атомов и молекул происходит дополнительная ионизация за счёт их соударения. Отдельные атомы также ионизируются в результате 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. 3.2, в). Этот способ зажигания дуги применяют при сварке плавящимся электродом.

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.3.2, 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 температур 2500...4000 °С.

Столб дуги, расположенный между катодной и анодной зонами, состоит из раскалённых и ионизированных частиц. Температура в этой зоне достигает 6000 - 7000 °С в зависимости от плотности тока при ручной дуговой сварке покрытыми электродами; при сварке же вольфрамовыми электродами в среде аргона средняя температура в центре столба достигает 15000 °С, а в гелии - 20000 °С.

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

Разная температура катодной и анодной зон и разное количество теплоты, выделяющейся в этих зонах, используется при решении технологических задач. При сварке деталей, требующих большого подвода теплоты для подогрева кромок, применяют прямую полярность. При сварке тонкостенных изделий, тонколистовых конструкций, а также сталей, не допускающих перегрева (высокоуглеродистые, нержавеющей, жаропрочные и др.), применяют сварку током обратной полярности. При этом не только обеспечивается меньший нагрев свариваемой заготовки, но и ускоряется процесс расплавления электродного материала.

Электрические свойства дуги описываются статической вольт-амперной характеристикой, представляющей собой зависимость между напряжением и током дуги в состоянии устойчивого горения (рис. 3.3 а).

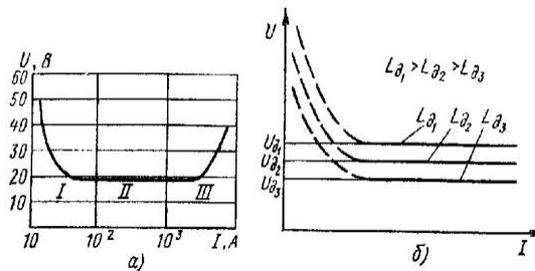


Рис.3.3. Статическая вольт-амперная характеристика дуги (а) и зависимость напряжения дуги от её длины (б).

Вольт-амперная характеристика дуги имеет три области: падающую - I, жёсткую - II и возрастающую - III. В области I (до 100 А) с увеличением тока напряжение значительно уменьшается. Это происходит в связи с тем, что при повышении тока увеличивается поперечное сечение, а следовательно, и проводимость столба дуги. В области II (100...1000 А) при увеличении тока напряжение сохраняется постоянным, так как сечение столба дуги и площадь анодного и катодного пятен увеличивается пропорционально току. Область II характеризуется постоянством плотности тока. В области III напряжение возрастает вследствие того, что увеличение плотности тока выше определённого 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 определённый характер переноса расплавленного электродного металла в сварочную ванну: I и II - крупнокапельный, III - мелкокапельный или струйный.

3.2.2. Источники питания сварочной дуги

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

Для возбуждения дуги в атмосфере воздуха даже при небольшом расстоянии между электродом и свариваемым изделием, измеряемым несколькими миллиметрами, 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 для источников постоянного тока - 90 В, а для источников переменного тока - 80 В.

Источник питания должен обеспечивать быстрое установление или изменение напряжения в зависимости от длины дуги. 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 более чем на 40...50 %.

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

$$I_d = I_n; U_d = U_n.$$

Для этого необходимо соответствие внешней вольт-амперной характеристики источника и статической вольт-амперной характеристики дуги.

Внешней характеристикой источника называется зависимость напряжения на его выходных клеммах от тока в электрической цепи. Внешние характеристики могут быть следующих основных видов: падающая - 1, пологопадающая - 2, жёсткая - 3 и возрастающая - 4 (рис. 3.4,а).

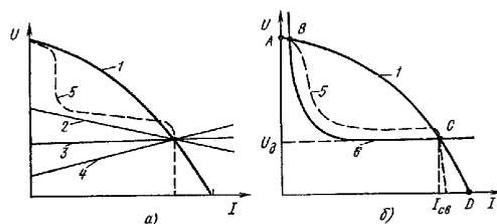


Рис.3.4. Внешние характеристики источников сварочного тока (а) и соотношение характеристик дуги и падающей характеристики тока при сварке (б)

Для питания дуги с жёсткой характеристикой применяют источники питания 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. 3.4,б). Точка С соответствует режиму устойчивого горения дуги, точка А - режиму холостого хода в работе источника питания в период, когда дуга не горит и сварочная цепь разомкнута. Режим холостого хода характеризуется повышенным напряжением. Точка D соответствует режиму короткого замыкания при зажигании дуги и её замыкании каплями жидкого электродного металла. Короткое замыкание характеризуется низким напряжением, стремящимся к нулю, и повышенным, но ограниченным током.

Источники сварочного тока с падающей характеристикой необходимы для облегчения зажигания дуги за счёт повышенного напряжения холостого хода, обеспечения устойчивого горения дуги и практически постоянной проплавливающей способности дуги, так как колебания её длины и напряжения (особенно значительные при ручной сварке) не приводят к значительным изменениям сварочного тока, а также для ограничения тока короткого замыкания, чтобы не допустить перегрева токопроводящих проводов и источников тока. Наилучшим образом приведённым требованиям удовлетворяет источник тока с идеализированной внешней характеристикой 5 (рис. 3.4)

Для обеспечения устойчивости горения дуги с возрастающей характеристикой применяют источники сварочного тока с жёсткой 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).

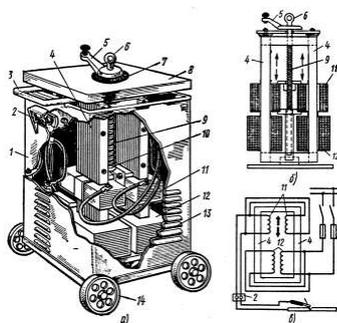


Рис.3.5. Сварочный трансформатор: а - внешний вид; б - схема регулирования сварочного тока; в - электрическая схема.

Сварочный трансформатор (рис.3.5) состоит из корпуса 1, внутри которого укреплен замкнутый магнитопровод 4 (сердечник), собранный 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 подаётся на электрод и изделие. Провода сварочной цепи присоединяются к зажимам 2. Сварочный ток плавно регулируется изменением 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 растёт. Для установления необходимого сварочного тока на крышке 8 корпуса трансформатора расположена шкала 7.

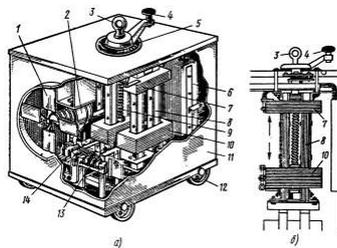


Рис.3.6. Сварочный выпрямитель: а - внешний вид; б - схема регулирования сварочного тока.

Сварочный выпрямитель (рис. 3.6) состоит из понижающего трехфазного трансформатора с подвижными катушками, выпрямительного блока с вентилятором, пускорегулирующей и защитной аппаратуры, смонтированных в кожухе.

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

Сварочный преобразователь (рис. 3.7) представляет собой машину, служащую для преобразования переменного тока в постоянный сварочный ток; он состоит из сварочного генератора постоянного тока и приводного трехфазного асинхронного электродвигателя 8, сидящих на одном валу и смонтированных 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 продольных пазах его уложены витки обмотки. Рядом с якорем находится коллектор, состоящий 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 витках его 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 этим же зажимам присоединяют сварочные провода, подводящие сварочный ток к электроду и изделию. Для охлаждения преобразователя во время работы на валу его имеется вентилятор 7.

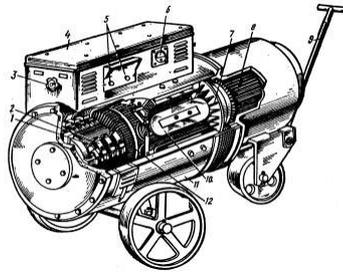


Рис.3.7. Сварочный преобразователь

Наиболее широкое применение находит источник 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.

Постоянный ток предпочтителен в технологическом назначении, поэтому некоторые сорта легированной стали лучше сваривать постоянным током. 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.



Рис.3.8. Invertec-T - сварочный источник постоянного тока, предназначенный для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом и ручной дуговой сварки штучными электродами.

В последние годы получили достаточно широкое распространение *инверторные источники питания* (рис.3.8) для сварки (ИИП). Небольшие размеры и масса, малая инерционность, улучшенные динамические свойства ИИП выгодно отличают их от традиционных технических решений. Источники питания на основе высокочастотных инверторных преобразователей применяют для дуговой сварки плавящимися и неплавящимися электродами, ультразвуковой и микроплазменной сварки, контактной сварки металла малых и средних толщин. Можно предположить, что в недалеком будущем на основе инверторов будут созданы также мощные ИИП для электрошлаковой сварки и сварки под флюсом.

Инвертор как составная часть ИИП представляет собой устройство, преобразующее постоянный ток в переменный. Он состоит из коммутирующих элементов, которые включены между источником постоянного напряжения и нагрузкой. Коммутация в силовом контуре инвертора производится циклически таким образом, что к нагрузке прикладывается знакопеременное напряжение. В результате через нагрузку течет переменный ток. Коммутация тока осуществляется с помощью полупроводниковых приборов, работающих поочередно в открытом или закрытом состоянии по заданному алгоритму.

Инверторный источник сварочного тока работает следующим образом. Напряжение однофазной или трехфазной сети промышленной частоты преобразуется входным выпрямителем в постоянное напряжение. Это напряжение в свою очередь преобразуется с помощью инвертора в переменное напряжение повышенной частоты (до десятков кГц), которое затем поступает на понижающий высокочастотный трансформатор. Вторичная обмотка трансформатора нагружена на диодный выпрямитель, к выходу которого через сглаживающий дроссель подключены электрод и изделие.

Питание трансформатора напряжением высокой частоты позволяет существенно снизить массу и объем материалов, идущих на изготовление трансформатора. Так, при частоте питающего напряжения 10 кГц масса трансформатора и его габаритные размеры уменьшаются по сравнению с частотой 50 Гц примерно в 3 раза, а при частоте 50 кГц уже в 15 - 17 раз. Например, расчетная масса трансформатора мощностью 20 кВА 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 коммутационные потери в ключевых элементах, в качестве которых для сварочных инверторов используют достаточно мощные тиристоры или транзисторы.

В первых образцах ИИП для дуговой сварки, которые появились в начале 80-х годов, были использованы инверторы на тиристорах. Основным недостатком тиристорных инверторов является сравнительно невысокая частота преобразования, которая зависит от времени выключения тиристоров. Современные быстродействующие тиристоры с минимальным временем выключения 20 мкс позволяют получить предельную частоту всего лишь 5 кГц. Инвертирование на более высокой частоте невозможно из-за вероятности возникновения аварийного режима, который называется опрокидыванием инвертора (короткое замыкание на выходе сетевого выпрямителя). Поэтому сейчас на ведущих мировых фирмах, выпускающих сварочные источники питания, отдают предпочтение более быстродействующим транзисторным инверторам.

3.2.3. Ручная дуговая сварка покрытыми электродами

В настоящее время для сварки на воздухе разработаны и успешно применяются электроды, которые при расплавлении создают надёжную газошлаковую защиту сварочной ванны от её взаимодействия с окружающей атмосферой и обеспечивают высокое качество наплавленного металла.

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

Ручная дуговая сварка покрытыми электродами остаётся одним из самых распространённых 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.

Существенным недостатком ручной дуговой сварки покрытыми электродами является невысокая производительность процесса и зависимость качества сварного шва от практических навыков сварщика.

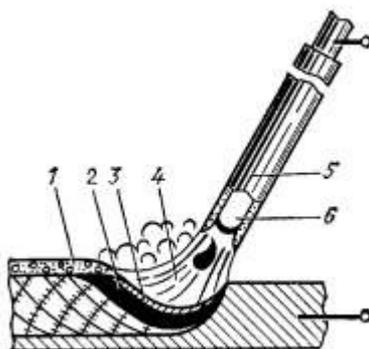


Рис. 3.9. Схема ручной дуговой сварки покрытым электродом:
1 - затвердевший шлак; 2 - сварочная ванна; 3 - слой расплавленного шлака; 4 - дуга; 5 - электродное покрытие; 6 - металлический стержень

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.

Образующиеся при расплавлении покрытия газы оттесняют воздух из реакционной зоны (зоны дуги) и таким образом способствуют созданию лучших условий для защиты нагретого металла.

Для повышения устойчивости горения сварочной дуги в электродное покрытие вводят соединения, содержащие ионы щелочных металлов. Пары этих соединений снижают сопротивление дугового промежутка за счёт 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, способствующая направленному движению газового потока. Это улучшает защиту сварочной ванны. Кроме того, втулка удлиняет дугу, увеличивая её напряжение и мощность, а следовательно, и глубину проплавления.

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

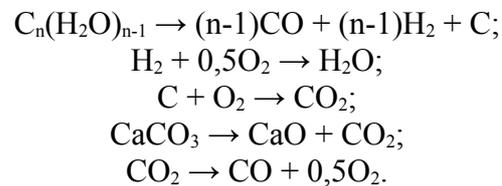
Ввиду того, что от токопровода в электродержателе сварочный ток протекает по металлическому стержню электрода, стержень разогревается. Этот разогрев тем больше, чем дольше протекание по стержню сварочного тока и чем больше его величина. Перед началом сварки металлический стержень имеет температуру окружающего воздуха, а к концу расплавления электрода его температура может значительно повышаться (у стержней из стали до 500 - 600 °С). Это приводит к увеличению скорости расплавления электрода по сравнению с начальной. Изменяется и глубина проплавления основного металла ввиду 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, 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 этого, на размере сварочной ванны и механических характеристиках соединения. Поэтому для повышения стабильности качества соединения используют источники питания с крутопадающими вольт-амперными характеристиками.

Электроды, например для сварки стали, представляют собой стержни, изготовленные из сварочной проволоки, на поверхность которой нанесён 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 компоненты - соединения, содержащие ионы щелочных металлов с низким потенциалом ионизации (Na_2CO_3 , K_2CO_3 , CaCO_3 , NaF , то есть поташ, мел, мрамор, полевой шпат и т.п.)

Газообразующие компоненты - вещества, разлагающиеся с выделением большого объема газа - мрамор, мел или органические вещества: декстрин, крахмал, целлюлоза, которые при нагреве ещё до расплавления металла в результате разложения и окисления дают много газообразных продуктов - CO_2 , CO , H_2 , H_2O .



Образующееся значительное количество газов обеспечивает хорошую защиту от атмосферы воздуха и, в частности, от азота. В то же время эта газовая среда является сама окислительной по отношению к железу и легирующим элементам.

Шлакообразующие компоненты - минералы: полевой шпат $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$; мрамор, мел CaCO_3 ; глинозём Al_2O_3 ; флюорит CaF_2 ; кварцевый песок SiO_2 ; иногда гематит Fe_2O_3 ; марганцевая руда, титановый концентрат $\text{TiO}_2 \cdot \text{FeO}$.

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 (так называемых ферросплавов), быстро растворяющихся в жидкой стали. Алюминий в покрытие вводят в виде порошка - пудры.

Некоторые компоненты могут выполнять несколько функций одновременно, например, мел, который, разлагаясь, выделяет много газа (CO_2), оксид кальция идёт 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. Нанесение покрытия на металлический стержень осуществляется в специальных прессах или методом окунания в жидкий замес.

Покрывания 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 значение 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, < 2 | 3-5 | 6-8 | 9-12 | 13-15 | 16-20 | 20
диаметр электрода, мм, < 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

$$I_{св} = (40 - 50)d_{эл} ;$$

$$I_{св} = (20 + 6d_{эл})d_{эл} ;$$

$$I_{св} = p \cdot r_{эл}^2 \cdot j,$$

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

Полученные значения сварочного тока корректируют, учитывая толщину металла и положение сварного шва. При толщине кромок $(1,3 - 1,6)d_{эл}$ расчетное значение сварочного тока уменьшают на 10 - 15 %, а при толщине кромок $> 3d_{эл}$ - увеличивают на 10 - 15 %. Сварку вертикальных и потолочных швов выполняют сварочным током, на 10 - 15 % уменьшенным против расчетного.

Напряжение на дуге при ручной дуговой сварке составляет 20 - 36 В и при проектировании технологических процессов ручной сварки не регламентируется.

Сварочный пост дуговой сварки - место производства сварочных работ - оснащается в зависимости от вида сварочных работ и выбранной технологии сварки.

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

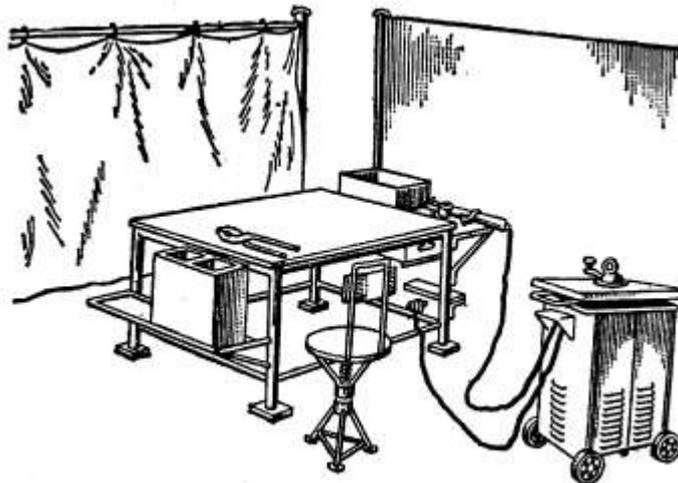


Рис.3.10. Сварочный пост для ручной электросварки

3.2.4. Автоматическая сварка под флюсом

Сварка под флюсом является самым распространенным способом механизированной дуговой сварки плавящимся электродом. Этот способ нашел широкое применение и стал одним из ведущих технологических процессов 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 производствах 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.

Преимущества автоматической сварки под флюсом:

- 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.

Недостатки автоматической сварки под флюсом:

- возможность сварки только в нижнем положении;
- необходимость более тщательной (по сравнению с ручной сваркой) подготовки кромок и более точной сборки деталей под сварку;
- невозможность сварки стыковых швов на весу, то есть 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. 3.11.

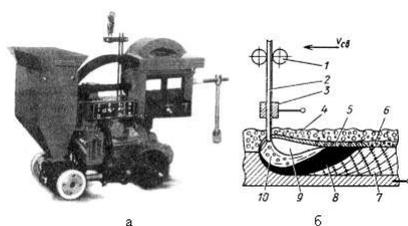


Рис.3.11. Автомат АДФ10030 (а) и схема процесса автоматической дуговой сварки под флюсом (б)

Возбуждение и поддержание дугового разряда, выполняется 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).

Под действием тепла, выделяемого 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, образующийся 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 (рис. 3.12).

Электроды по отношению к направлению сварки могут быть расположены последовательно или перпендикулярно. При последовательном расположении глубина проплавления шва несколько увеличивается, а при перпендикулярном уменьшается. Второй вариант расположения электродов позволяет выполнять сварку при повышенных зазорах между кромками. Изменяя расстояние между электродами, можно регулировать форму и размер шва.

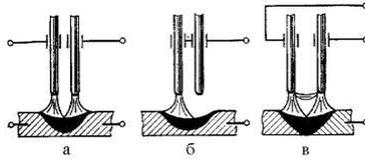


Рис.3.12. Многодуговая сварка: а - двумя дугами; б - расщеплённым электродом; в - трёхфазной дугой

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 путем 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: плавные, получаемые сплавлением входящих в них компонентов в электрических или пламенных печах с последующей грануляцией, выливанием расплава в воду; или керамические, получаемые путем грануляции замеса из тонко измельченных компонентов, соединенных между собой жидким стеклом. В отличие от плавных в керамических флюсах могут содержаться металлические порошки - раскислители и легирующие компоненты, так как в процессе изготовления керамические флюсы не подвергаются нагреву до высоких температур.

Наибольшее распространение в производстве получили плавные флюсы, которые представляют собой сплав оксидов и солей металлов.

По химическому составу различают окислительные, безокислительные и бескислородные.

Окислительные флюсы содержат в основном оксиды кремния и марганца. Для придания флюсу необходимых свойств 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 этого 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 .

Основу безокислительных флюсов составляют прочные оксиды металлов и фториды. Оксиды кремния и марганца содержатся в незначительных количествах или вообще отсутствуют. Такие флюсы преимущественно используются для сварки и наплавки высоколегированных сталей. Например, флюс АН-30 имеет 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.

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 (~70 мм) оказывается возможным повысить плотность тока до 200-250 А/мм² (при РДС 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 РДС он составляет 1-2 см².

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

При автоматической сварке под флюсом требования к подготовке кромок и сборке изделия под сварку более высокие, чем при ручной сварке.

Свариваемые кромки перед сборкой должны быть тщательно отчищены от ржавчины, грязи, масла, влаги и шлаков. Это особенно важно при больших скоростях сварки, когда загрязнения, попадая в зону дуги, приводят к образованию пор, раковин и неметаллических включений. Очистку кромок на ширине 50 - 60 мм производят пескоструйной обработкой или протравливанием и пассивированием.

Перед сваркой детали закрепляют на стендах или иных устройствах с помощью различных приспособлений или прихватывают ручной сваркой. Прихватки длиной 50 - 70 мм располагают на расстоянии не более 400 мм друг от друга, а крайние прихватки - на расстоянии не менее 200 мм от края шва. Прихватки должны быть тщательно отчищены от шлака, брызг металла.

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

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

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 должен быть предусмотрен зазор, зависящий от толщины металла.

Значительный объем расплавленного металла большая глубина проплавления и некоторый перегрев ванны могут привести к вытеканию металла в зазор и нарушению 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. При невозможности выдержать зазор между кромками менее 1 мм принимают меры по предупреждению подтекания жидкого металла как и при односторонней сварке.

3.2.5. 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, имеет довольно высокую производительность, достигающую при ручной сварке 40-50 м/ч, а

при автоматической - 200 м/ч. Рабочее место, принципиальная схема поста и горелка для ручной сварки в среде инертных газов показаны на рис.3.13 -3.15.

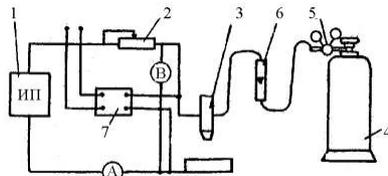


Рис.3.14. Схема поста для ручной сварки на постоянном токе с местной защитой шва инертными газами: 1 - источник питания; 2 — балластный реостат; 3 - горелка; 4 - баллон с газом; 5 - редукционный вентиль; 6 - расходомер газа; 7 - осциллятор.

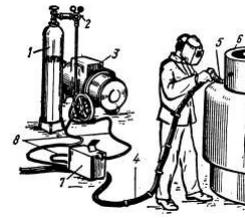
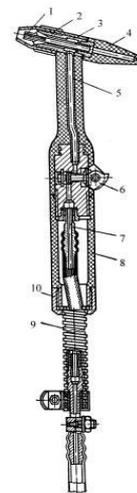


Рис.3.13. Оборудование рабочего места электросварщика при механизированной сварке крупных изделий в среде инертных газов: 1 - баллон с инертным газом; 2 - газовый редуктор; 3 - источник сварочного тока; 4 - гибкие шланги; 5 — горелка; 6 - свариваемое изделие; 7 - подающий механизм; 8 - сварочные провода.

Рис.3.15. Ручная горелка для сварки неплавящимся электродом: 1 - токоведущая цанга; 2 - сопло; 3 - газовая камера; 4 - колпак защитный; 5 - мундштук; 6 - газовый вентиль; 7 - газо- и токоподвод; 8 - рукоятка; 9 - провод; 10 - накидная гайка



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 производится вручную.

Полуавтоматическая сварка. Этот процесс перспективен для изделий из легированных нержавеющей сталей с криволинейными и короткими швами, особенно в монтажных условиях.

Принципиальная схема держателя полуавтомата приведена на рис. 3.16.

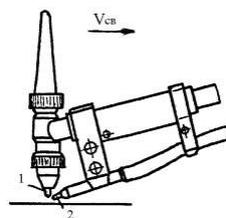


Рис.3.16. Схема процесса полуавтоматической сварки: 1 - вольфрамовый электрод; 2 - присадочная проволока

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 проплавления (активирующих флюсов) может быть выполнена с полным проваром при толщине не более 5 мм.

Процесс сварки без присадочного материала чрезвычайно прост и получил достаточно широкое распространение. Образование сварочного шва без присадки происходит за счет расплавления стыкуемых кромок. Свариваемые заготовки собираются без зазора.

Процесс автоматической сварки с присадочной проволокой получил широкое распространение для соединения заготовок толщиной более 1,5 мм. Присадочная проволока подается с заданной скоростью, которая регулируется в достаточно широких пределах.

В состав оборудования для автоматической сварки входят: сварочная головка, устройство для перемещения сварочной головки или изделия, аппаратура управления механизмами автомата (рис.3.17,а).

Простейшая сварочная головка включает в себя: сварочную горелку, устройства для установочных перемещений горелки (настройка на шов, установка длины дуги, рис.3.17,б).

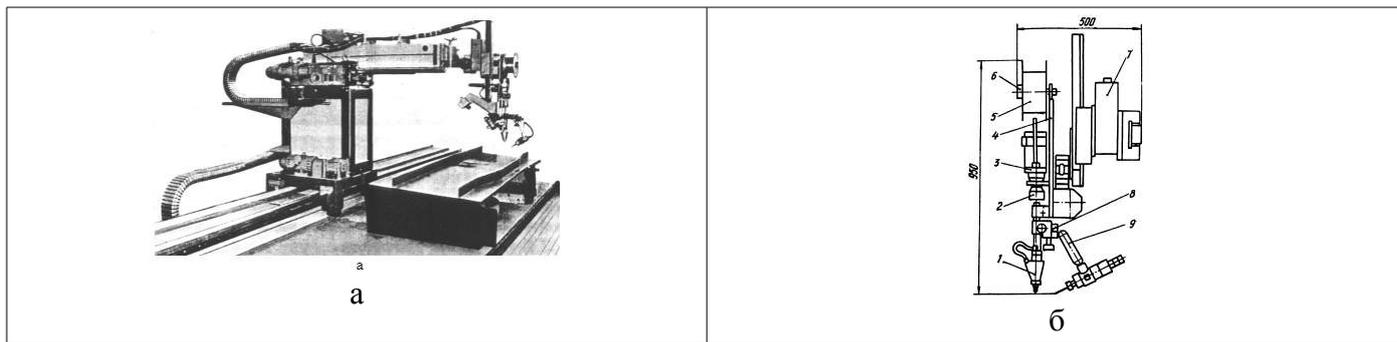


Рис.3.17. Общий вид аппарата АД238 для автоматической аргоно-дуговой сварки с присадкой (а) и схема сварочной головки Т451.01.01.000 (б): 1 — горелка; 2 - механизм подачи; 3 - привод; 4 — подвеска; 5 - кассета; 6 - тормозное устройство; 7 — суппорт двухкоординатный; 8 - корректор; 9 - подвеска

Обычно сварочная головка содержит и другие функциональные узлы: механизм для подачи присадочной проволоки, механизмы для установочных перемещений мундштука для подвода присадки к сварочной ванне, устройство для колебания горелки поперек стыка (колебатель); автоматический регулятор напряжения на дуге и т.п.

Головка может быть самоходной, устанавливаться на самоходную тележку-трактор (автомат тракторного типа) или укрепляться неподвижно, если сварочное движение осуществляется изделием (подвесная головка). На самоходных головках устанавливается 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 и трансформаторы.

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 затем вакуумируется до разряжения 10 - 2 Па (для удаления воздуха) и заполняется защитным газом. При работе сварщик находится вне камеры. Сварку выполняют вручную, используя рукава-перчатки, 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.3.18).

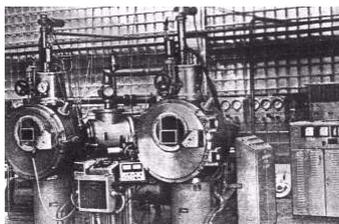


Рис.3.18. Двухкамерная установка повышенной производительности для аргонодуговой сварки в контролируемой атмосфере

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

В опытном или единичном производстве применение камер с общей защитой, и тем более обитаемых, нецелесообразно из экономических соображений. В этих случаях для защиты металла шва и околошовной зоны применяют местные защитные камеры, которые устанавливают на свариваемые узлы с обеспечением герметичности разъемов при перемещении заготовок (рис.3.19).

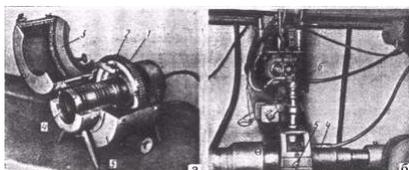


Рис.3.19. Аргонодуговая сварка в камерах с местной защитой:

- а - внешний вид камеры для сварки неповоротных стыков трубопроводов; б - установка для сварки поворотных стыков деталей авиационных узлов; 1 - механизм перемещения электрода;
- 2 - вольфрамовый электрод и копир; 3 - откидная крышка-люк;
- 4 - свариваемая деталь; 5 - камера; 6 - сварочная головка.

Наиболее широко в сварочном производстве используется струйная защита, при которой защитные газы подают в зону сварки для оттеснения воздуха от нагретого и расплавленного металла. Как правило, вытекающая из сопла горелки сплошная струя защитного газа симметрична оси электрода (рис. 3.20).

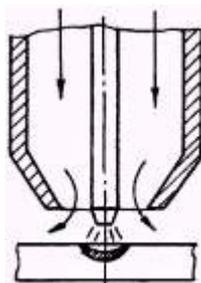


Рис.3.20. Подача защитного газа в зону сварки

При сварке стыковых швов со струйной защитой воздух может поступать к переплавленному дугой металлу через зазор между свариваемыми деталями. Это 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.3.21).

Технологические характеристики процесса сварки вольфрамовым электродом зависят главным образом от рода, полярности, величины сварочного тока, длины дуги, размеров и формы торца вольфрамового электрода.

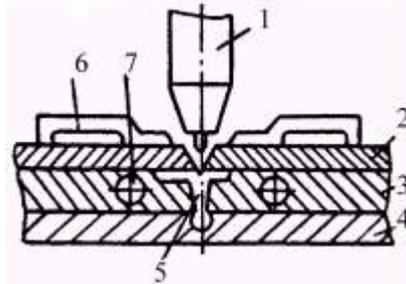


Рис.3.21. Схема сборки стыковых соединений: 1 - сварочная горелка; 2 - свариваемое изделие; 3 - медная часть подкладки; 4 - стальная часть подкладки; 5 - канал для защитного газа; 6 - прижим; 7 - канал для охлаждающей воды

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 с энергетической точки зрения сварка током обратной полярности невыгодна. Концентрация нагрева в этом случае ниже, швы имеют меньшую глубину и большую ширину проплавления, чем при сварке на 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 является наиболее распространенным процессом при изготовлении конструкций из алюминиевых и магниевых сплавов. Очистка поверхностей от оксидов происходит в полупериоды 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 Х18Н9Т толщиной 16 мм приводит к линейному возрастанию силового воздействия дуги с 6Ч10-2 до 15Ч10-2 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 70 % (от 10 до 18 мм). Более медленный рост проплавляющего действия дуги связан с тем, что с увеличением сварочного тока одновременно растет диаметр столба дуги и расширяется пятно нагрева, а плотность теплового потока меняется незначительно.

3.2.6. Сварка в углекислом газе

В производстве сварных конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей широкое применение находит полуавтоматическая, меньше - автоматическая 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.

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

Преимущества этого способа сварки: повышение производительности по сравнению с ручной сваркой в 1,2 - 1,5 раза; возможность сварки в любом пространственном положении и стыковых швов "на весу"; высокая маневренность и мобильность (по сравнению с автоматической сваркой); возможность визуального контроля за направлением дуги по стыку. Недостатки: сильное разбрызгивание металла при сварке на токах 200 - 400 А и 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 взаимодействует с металлом и легирующими элементами, окисляя их.

Растворяющийся в сплаве кислород может реагировать с примесями металла с образованием шлаков и газов.

В хвостовой части сварочной ванны шлак всплывает на поверхность металла, а образующиеся газообразные продукты могут служить причиной появления пор в металле шва.

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

Металл, наплавленный при сварке в углекислом газе, чище по шлаковым включениям, и поэтому 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 токи (прямой полярности) 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 особо характерным является применение электродной проволоки малых диаметров (0,8 - 2,0 мм), тока высокой плотности и соответственно большой скорости плавления электрода. При сварке на форсированных режимах тонкими проволоками наиболее целесообразной является плотность тока в электроде 250-450 А/мм².

Увеличение диаметра электродной проволоки (при всех прочих равных условиях) сопровождается существенным уменьшением коэффициента наплавки, некоторым увеличением ширины шва и уменьшением глубины проплавления основного металла.

Диаметр сварочной проволоки d_s , 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_s , мм	0,5-0,8	0,8-1,0	1,0-1,2	1,6-2,0	2,0	2,0-2,5

Параметром, оказывающим большое влияние на процесс сварки, является сварочный ток. Повышение силы тока вызывает увеличение глубины проплавления, при этом количество наплавленного металла возрастает медленнее, чем проплавление и доля электродного металла в

металле шва существенно уменьшается. Последнее значительно увеличивает возможность появления горячих трещин в металле швов, выполненных на сталях с повышенным содержанием углерода. Ширина шва с повышением силы тока сначала увеличивается, а затем несколько уменьшается. Оптимальные режимы сварки соответствуют максимальной ширине шва.

С увеличением напряжения дуги глубина проплавления основного металла уменьшается, а ширина шва и количество наплавленного и проплавленного металла слегка увеличиваются. Повышение напряжения дуги сопровождается усилением разбрызгивания жидкого металла и ухудшением газовой защиты зоны сварки, приводящим к порам и повышению содержания газов в металле швов.

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, предредукторным осушителем, подогревателем газа, редуктором, ротаметром, амперметром и вольтметром (рис. 3.22).

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. Предредукторный осушитель предназначен для очистки газа от влаги, которая может содержаться в баллоне. Осушение газа осуществляется адсорбентами: медным купоросом, силикагелем или алюмогелем; наибольшей глубиной осушки и влагоемкостью обладает цеолит марки NaA-2КТ.

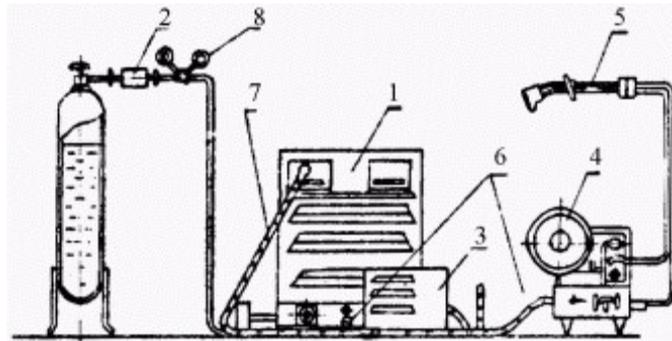


Рис.3.22. Общий вид поста сварки плавящимся электродом в углекислом газе: 1 - источник сварочного тока; 2 - подогреватель газа; 3 - шкаф управления; 4 - полуавтомат; 5 - горелка; 6 - кабели (сварочные); 7 - кабель (управления); 8 - редуктор газовый

Непрерывный отбор из баллона газообразной CO_2 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.

Непрерывный отбор из баллона газообразной CO_2 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.

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 зависит в основном от назначения (специализации) полуавтоматов.

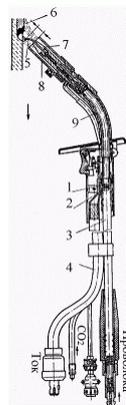
Наиболее важный элемент полуавтомата - механизм подачи проволоки. По способу подачи проволоки различают полуавтоматы толкающего и тянущего типа.

Наиболее распространены полуавтоматы толкающего типа. 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. В этом случае проволока протаскивается через гибкий шланг. Тянущая система обеспечивает устойчивую подачу мягкой и тонкой проволоки. Встречаются полуавтоматы с двумя синхронно работающими механизмами подачи. Один из них толкает, а другой протаскивает сварочную проволоку. Для сварки выпускают полуавтоматы, рассчитанные на номинальные токи 150 - 600А для проволок диаметром 0,8 - 3,5 мм со скоростями подачи 1,0 - 0,17 м/мин.

Основные конструктивные элементы горелки для полуавтоматической сварки в CO_2 показаны на рис.3.23.

Рис.3.23. Горелка с шлангом для полуавтоматической сварки в CO_2 : 1 - спираль; 2 - оболочка; 3 - слой изоляции; 4 - провод; 5 - электродная проволока; 6 - газовая струя; 7 - наконечник; 8 - сопло; 9 - мундштук



Полуавтоматы комплектуются источниками питания - выпрямителями с жесткой характеристикой.

3.2.7. Плазменная сварка

Плазменная сварка относится к дуговым видам сварки, при этом в качестве источника нагрева свариваемых заготовок используется *сжатая дуга*.

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

При обычной дуговой сварке дуга горит свободно между электродом и изделием. Однако, 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.

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 - 3000 °С до 40000 - 50000 °С.

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:

Горелки *прямого* действия для сварки плазменной дугой, в которых одним из электродов является обрабатываемый материал (рис. 3.24, а). В этом случае используют два энергетических источника: плазменную струю и электрически активное пятно дуги. Внутренний КПД такой горелки, т.е. использование подведенной к ней электроэнергии, достигает 60 - 80 %.

Горелки *косвенного* действия для сварки плазменной струей (рис.3.24, б, в). Для 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.

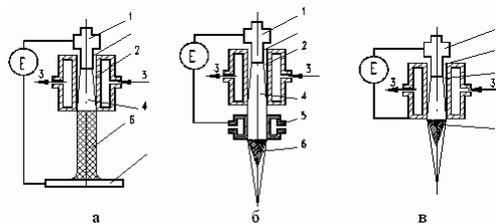


Рис.3.24. Принципиальные схемы дуговых плазменных горелок (плазмотронов) для получения: а - плазменной дуги, б и в - плазменной струи. 1 - электрод, 2 - канал, 3 - охлаждающая вода, 4 - столб дуги, 5 - сопло, 6 - плазменная струя, Е - источник тока

Состав плазмообразующего газа (аргон, гелий, азот и пр.) выбирают в зависимости от требований, предъявляемых к процессу. Электроды изготавливают 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 и длина дуги, а также расход плазмообразующего газа. Увеличение силы тока и длины дуги приводит к возрастанию температуры струи; повышение расхода плазмообразующего газа при больших его значениях снижает среднemasсовую температуру струи.

Применение плазменной сварки. Исследования в области плазменных технологий как в нашей стране, так и за рубежом были направлены на решение проблем авиа- и ракетостроения, электроники, ядерной энергетики, криогенной техники. Основное внимание уделялось улучшению качества сварки изделий из алюминия, коррозионностойких и жаропрочных сплавов и титана в большом диапазоне толщин, различных типов соединений. В конце 60-х годов сварка проникающей плазменной дугой переменного тока была использована в СССР в производстве алюминиевых топливных баков ракет. Аналогичная технология спустя 10 лет была внедрена в США взамен аргонодуговой сварки наружных алюминиевых баков на многоразовом космическом корабле "Шаттл". Этой технологии отводят большую роль и при строительстве космических станций. В 1989

г. НАСА (NASA) выбрала технологию плазменной сварки для изготовления твердотопливных двигателей космической ракеты для доставки конструкций международной космической станции "Freedom".

Преимущества плазменной сварки состоят в следующем:

- По сравнению с аргонодуговой плазменно-дуговая сварка отличается более стабильным горением дуги. При этом обеспечивается более равномерное проплавление кромок.
- По проплавляющей способности плазменная дуга занимает промежуточное положение между электронным лучом и дугой, горящей в аргоне.
- Столб дуги и струя плазмы имеют цилиндрическую форму, поэтому площадь поверхности металла, через которую осуществляется теплопередача от струи к металлу, не зависит от расстояния между электродом горелки и изделием.
- Благодаря цилиндрической форме столба дуги процесс плазменно-дуговой сварки менее чувствителен к изменению длины дуги, чем аргонодуговая сварка. Изменение длины дуги конической формы (при аргонодуговой сварке) всегда ведет к изменению диаметра пятна нагрева, а следовательно, и к изменению ширины шва. Плазменная сварка позволяет иметь практически постоянный диаметр пятна и дает возможность стабилизировать проплавление основного металла. Это свойство плазменной дуги с успехом используется при сварке очень тонких листов.

Отдельно следует выделить сварку *микроплазменной дугой*.

Микроплазменной дугой (сила тока 0,1...15А) 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;
- облегчается доступ к объекту сварки и улучшается зрительный обзор рабочего пространства (на токе ~ 15 А длина дуги достигает 10 мм).

Наиболее часто встречающиеся типы соединений при микроплазменной сварке - соединения с отбортовкой.

Микроплазменная сварка 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 широко применяется в производстве и ремонте деталей электроники и космонавтики, измерительных инструментов, часов (в том числе ручных), ювелирных изделий, металлических фильтров, термопар и тонкостенных трубок, зубопротезировании.

3.3. Электрошлаковая сварка

Электрошлаковая сварка (ЭШС) - процесс образования неразъемного соединения, при котором расплавление основного и присадочного металла осуществляется за счёт тепла, выделяемого при прохождении 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. 3.25.

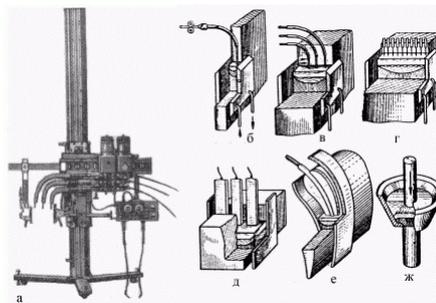


Рис.3.25. Трёхэлектродная установка VUZ-ETZ-450 (а) и основные схемы процессов электрошлаковой сварки: б - сварка одним электродом металла толщиной до 60 мм; в - трёхфазная сварка металла толщиной 450 мм тремя электродами с возвратно-поступательным движением; г - многоэлектродная сварка металла практически неограниченной толщины; д - сварка пластинчатыми электродами; е - сварка плавящимся мундштуком; ж - контактно-шлаковая сварка стержней.

Шлаковая ванна образуется (наводится) путем 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, а ширина определяется зазором между свариваемыми кромками. Глубину шлаковой ванны выбирают в зависимости от технологических условий (состава основного металла, режима сварки и др.).

Необходимая для осуществления шлакового процесса энергия получается от источника питания с жёсткой 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. Проходя через шлаковую ванну, ток нагревает ее до температуры $\sim 2000^{\circ}\text{C}$, 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 основной металлы стекают на дно шлаковой ванны, образуя сварочную (металлическую) ванну. По мере удаления источника нагрева происходит кристаллизация металла сварочной ванны. Расплавленный шлак, находящийся над металлической ванной, достаточно надежно защищает металл от воздействия воздуха. 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 детали к концу, при этом соприкасаясь с охлажденными ползунами, образует на них тонкую шлаковую корку, исключая непосредственный контакт расплавленного металла с поверхностью ползуна.

Расход флюса при этом способе сварки невелик и не превышает 5 % массы наплавленного металла. Ввиду малого количества шлака легирование наплавленного металла происходит, в основном, за счёт электродной проволоки. При этом доля основного металла в сварном шве может быть снижена до 10 - 20 %.

По сравнению со сварочной дугой шлаковая ванна является менее концентрированным источником тепла, 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 $0,1 \text{ А/мм}^2$ (при ручной дуговой сварке покрытыми электродами $j = 10 - 30 \text{ А/мм}^2$; 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 достаточно большого сечения.

Электрошлаковую сварку, как правило, 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.3.26).

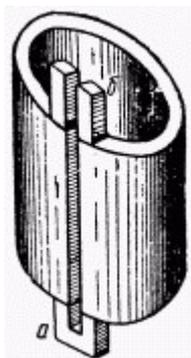


Рис.3.26. Начальные (а) и выходные (б) планки, применяемые при электрошлаковой сварке

Электрошлаковая сварка позволяет выполнять не только прямолинейные, но и кольцевые швы (рис.3.28). Вращение изделия осуществляется на роликовой опоре или другим способом.

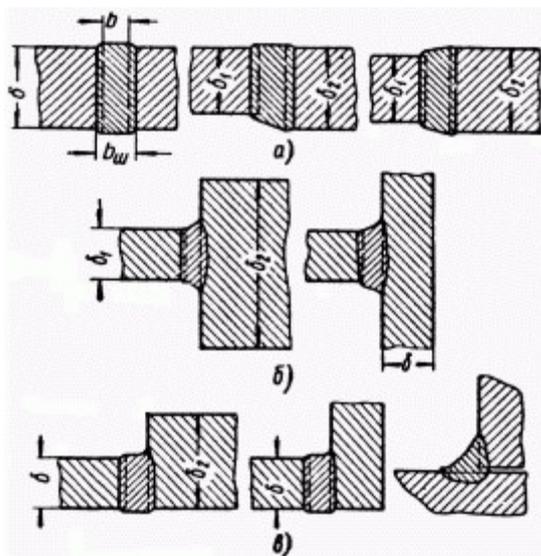


Рис.3.27. Виды соединений, выполняемых электрошлаковой сваркой:
 а - стыковые; б - тавровые; в - угловые; d - толщина металла;
 b - ширина зазора; бш - ширина шва

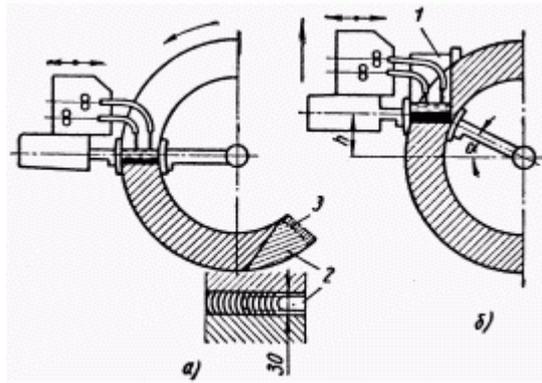


Рис.3.28. Схема электрошлаковой сварки кольцевого шва: а - сварка средней части шва; б - замыкание шва; 1 - выходной кокиль; 2 - разделка начала шва для его замыкания; 3 - заходная планка; а - угол перемещения ползуна к началу замыкания; h - высота подъёма аппарата к началу замыкания шва

3.4. Сварка электронным лучом

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) основана на использовании для нагрева энергии электронного луча.

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 используется для расплавления металла.

Для сварки необходимо получить свободные электроны, сконцентрировать их и сообщить им большую скорость с целью увеличения их энергии, которая должна превратиться в теплоту при торможении в свариваемом металле.

Получение свободных электронов осуществляется путём применения раскаленного металлического катода, эмитирующего (испускающего) электроны. Ускорение электронов обеспечивается электрическим полем с высокой разностью потенциалов между катодом и анодом. Фокусировка - концентрация электронов - достигается использованием кольцевых магнитных полей. Резкое торможение электронного потока происходит автоматически при внедрении электронов в металл. Электронный луч, используемый для сварки, создается в специальном приборе - электронной пушке.

Электронная пушка представляет собой устройство, с помощью которого получают узкие электронные пучки с большой плотностью энергии (рис.3.29).

Пушка имеет катод (1), который размещен внутри прикатодного электрода (2). На некотором удалении от катода находится ускоряющий электрод - анод (3) с отверстием. Прикатодный и ускоряющий электроды имеют форму, обеспечивающую такое строение электрического поля между ними, которое фокусирует электроны в пучок с диаметром, равным диаметру отверстия в аноде. Положительный потенциал ускоряющего электрода может достигать нескольких десятков тысяч вольт, поэтому электроды, эмиттированные катодом, на пути к аноду приобретают значительную скорость и, соответственно, кинетическую энергию. После ускоряющего электрода электроны движутся равномерно. Питание пушки электрической энергией осуществляется от высоковольтного источника постоянного тока. Электроны имеют одинаковый заряд, поэтому они отталкиваются друг от друга, вследствие чего диаметр пучка увеличивается, а плотность энергии в пучке уменьшается.

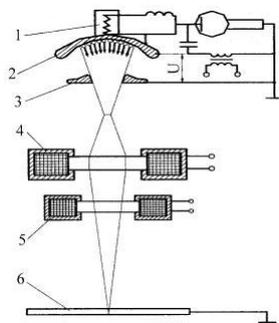


Рис. 3.29. Схема устройства электронно-лучевой пушки

Для 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 помещают магнитную отклоняющую систему (5), позволяющую направлять 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 величины заряда (в данном случае - заряд электрона "e") на разность потенциалов между этими двумя точками "U": $A = e \cdot U$. Эта работа затрачивается на сообщение электрону кинетической энергии $E = m_e \cdot v^2 / 2$, то есть

$$e \cdot U = m_e \cdot v^2 / 2.$$

Энергия электронов может достигать больших значений и 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 и глубокий шов. Глубина проплавления достигает 200 - 400 мм, а отношение глубины проплавления к средней ширине шва составляет 20...30 (рис.3.30).

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. В связи с этим канал в сварочной ванне часто называют пародинамическим.

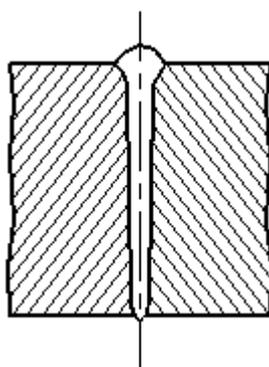


Рис.3.30. Типичная форма сварного шва при ЭЛС

Технологические *возможности и преимущества* электронно-лучевой сварки состоят в следующем.

- При ЭЛС возможно соединение за один проход металлов и сплавов толщиной в наиболее широком среди других методов сварки диапазоне - от 0,1 до 400 мм.
- Благодаря высокой концентрации энергии в луче, минимальному вводу тепла и высокой скорости охлаждения, зона термического влияния при ЭЛС имеет существенно меньшую протяженность, а снижение свойств в ней относительно небольшое. Особое значение это имеет 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, имеющее место при ЭЛС, обуславливает значительно большую скорость отвода тепла 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 количества тепла при ЭЛС, особенно на импульсном режиме, по сравнению с дуговой сваркой 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 дают возможность использовать электронный луч при сварке в узкую щель, когда методы дуговой сварки не могут быть использованы.
- 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.
- Эффективная защита металла от взаимодействия с газами в процессе сварки, осуществляемой в высоком вакууме.
- Отклонение потока электронов в магнитном поле осуществляется практически безынерционно, что дает возможность перемещать электронный луч по сложным контурам по программе с использованием электронно-вычислительной техники.
- Существенное - в 8 - 10 раз - снижение энергетических затрат по сравнению с другими дуговыми методами.
- ЭЛС является наиболее рациональным методом соединения:
 - изделий из тугоплавких металлов;
 - изделий из термически упрочненных металлов, когда нежелательна, затруднена или невозможна последующая термообработка;
 - изделий после окончательной механической обработки при необходимости обеспечения минимальных сварочных деформаций;
 - конструкций больших толщин ответственного назначения.

Недостатки метода ЭЛС:

- Сложность и высокая стоимость оборудования.
- Необходимость наличия вакуумных камер, что ограничивает размеры свариваемых изделий.
- Вредное рентгеновское излучение в процессе ЭЛС.
- Необходимость высококвалифицированного персонала.

Схема и общий вид установки для сварки в *высоком вакууме* приведены на рис.3.31. Такие установки 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 отдельных деталей, узлов при сборке космических платформ и различных ремонтных работах. В настоящее время силами ИЭС им. Е.О. Патона создана и прошла успешные испытания на борту орбитальной станции "Мир" аппаратура и набор специализированных инструментов для выполнения ручной электронно-лучевой сварки в космосе.

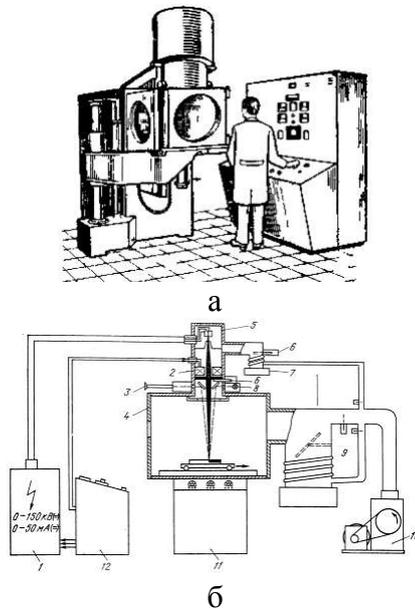


Рис.3.31. Общий вид (а) и схема (б) установки для электронно-лучевой сварки: 1 - высоковольтный источник питания; 2 — электромагнитная линза и отклоняющие катушки; 3 - телескопическое устройство для наблюдения; 4 - сварочная камера; 5 - электронно-лучевая пушка; 6 - вентиль; 7 - диффузионный насос; 8 - освещение; 9 - вакуумный вентиль; 10 - роторный форвакуумный насос; 11 - пульт управления движением детали; 12 - электрический пульт управления

3.5. Сварка лазером

Лазер, или оптический квантовый генератор (ОКГ), создает мощный импульс монохроматического излучения за счет возбуждения атомов примеси в кристалле (рубин) или в газах.

Можно построить ОКГ на полупроводниках и в этом случае, используя электрическое возбуждение вместо оптического, можно существенно повысить КПД источника энергии. Этот новый источник энергии высокой концентрации сразу нашел применение в технике связи и в промышленности для обработки металлов и других материалов.

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

Возбуждение атомов примесей может происходить различными путями, но наиболее часто это осуществляется в результате поглощения лучистой энергии (лампы накачки). Переход из возбужденного состояния атома в стабильное может происходить не сразу, а по отдельным ступеням. Если эти ступени близки, то переход происходит без излучения кванта энергии, а за счет перераспределения энергии электронов внутри атома. Некоторые из таких промежуточных ступеней - уровней возбуждения обладают повышенной устойчивостью.

Схема работы оптического квантового генератора или лазера, может быть представлена следующим образом (рис.3.32). Атомы какого-либо элемента возбуждаются непрерывным источником энергии - лампы 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 затем, 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.

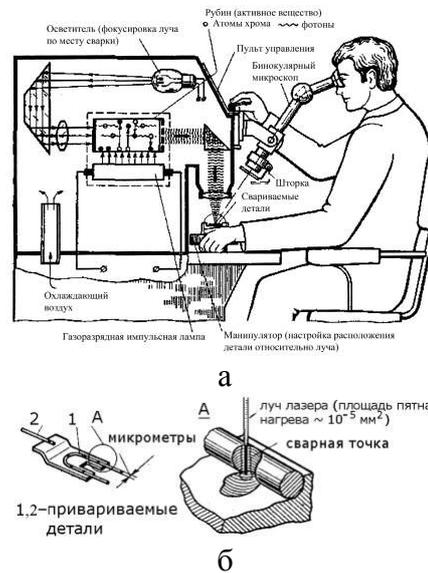


Рис. 3.32. Установка для сварки лазером (а) и схема образования соединения при лазерной сварке (б)

Для сварки часто используют установки с использованием монокристаллов корунда Al_2O_3 , в котором небольшое число атомов алюминия Al заменено атомами хрома Cr, служащего излучателем. Такой кристалл представляет собой искусственный рубин.

Кристалл ограничен строго параллельными гранями, из которых одна - непроницаемая для света (закрыта 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. Поток квантов энергии (фотонов), направленный на поверхность твердого тела, трансформирует свою энергию в тепловую, и температура твердого тела резко возрастает, так как поток фотонов обладает очень высокой концентрацией энергии.

Сварка лазером не требует вакуума и ведется в импульсном режиме, так как постоянный приток энергии влияет на излучатель (разогрев кристалла рубина). Режим сварки регулируется следующими параметрами: частотой, длительностью импульса и степенью расфокусирования луча лазера до уровня плотности энергии, необходимого для сварки данного изделия. Коэффициент использования подаваемой мощности в этом виде сварки очень невысок ($\sim 1 \dots 1,5 \%$), но соединение целого ряда изделий можно осуществить только таким образом (например, неметаллические материалы). Кроме того, поток фотонов можно использовать для прошивки отверстий в самых твердых материалах, резки металлов и их поверхностной обработки.

3.6. Контактная сварка

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

3.6.1. Точечная сварка

Основным типом соединения при точечной сварке является нахлесточное (рис. 3.33).

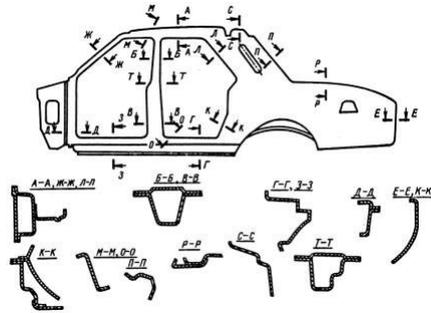


Рис.3.33. Схема нахлесточных соединений боковины кузова легкового автомобиля

Свариваемые детали 1 (рис. 3.34) собирают внахлестку и зажимают усилием $F_{св}$ между двумя электродами 2, подводящими ток большой силы (до нескольких десятков кА) к месту сварки от источника электрической энергии 3 невысокого напряжения (обычно 3 - 8 В).

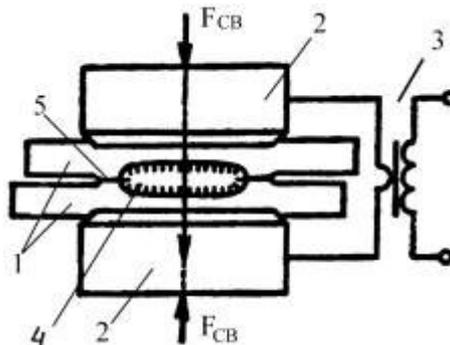


Рис.3.34. Схема точечной сварки

Детали нагреваются кратковременным (0,01 - 0,5 с) импульсом тока до появления расплавленного металла в зоне контакта 4. Нагрев сопровождается пластической деформацией металла и образованием уплотняющего пояска 5, предохраняющего жидкий металл от выплеска и от взаимодействия с воздухом.

Теплота, используемая при сварке, зависит от сопротивления между электродами и выделяется при прохождении тока непосредственно в деталях, контактах между ними и контактах деталей с электродами. Сопротивления самих электродов должны быть незначительны, так как выделяющаяся в них теплота не участвует в процессе сварки. Поэтому сечение электродов должно быть относительно большим, а материал электродов - обладать большой электро- и теплопроводностью. Электроды для точечной сварки изготавливают главным образом из меди и её сплавов.

Для осуществления процесса точечной сварки используют специальные машины контактной сварки (рис.3.35), которые в процессе работы выполняют две основные функции - сжатие и нагрев соединяемых деталей.

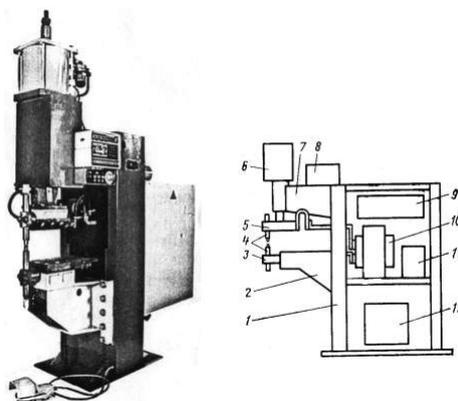


Рис. 3.35. Общий вид машины точечной сварки (а) и её основные узлы (б)

В конструкции любой машины условно можно выделить механическое и электрическое устройства.

Основной частью механического устройства машины для точечной сварки (рис. 3.35,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 соответствующая пневмоаппаратура 8. Привод усилия может быть также пневмогидравлическим, гидравлическим и пр. 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 смонтирована в отдельном шкафу управления. Контактор 12 подключает сварочный трансформатор к электрической питающей сети и отключает его.

К электрическому устройству 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 и поэтому одновременно являются частями электрического и механического устройств машины. Все части вторичного контура изготавливают из меди или медных сплавов, имеющих высокую электропроводность. Большинство элементов вторичного контура, сварочный трансформатор и контактор имеют внутреннее водяное охлаждение.

Электрическое устройство машины предназначено для обеспечения необходимого цикла нагрева металла в зоне сварки.

3.6.2. Шовная сварка

Шовная сварка - способ, при котором детали соединяются швом, состоящим из отдельных сварных точек (литых зон), перекрывающих или не перекрывающих одна другую. При сварке с перекрытием точек шов будет герметичным (рис. 3.36,а), а при сварке без перекрытия шов практически не отличается от ряда точек, полученных при точечной сварке.

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

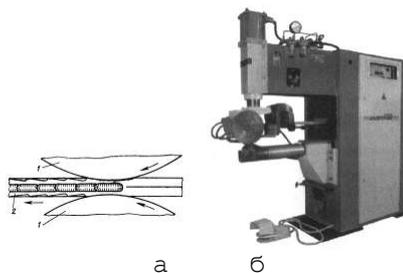


Рис. 3.36. Схема процесса (а) и машина шовной сварки МШ-3208 (б)

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. Наибольшее распространение имеет 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, что улучшает охлаждение металла в контактах ролик - деталь по сравнению с непрерывным движением свариваемых деталей. Шовная сварка в большинстве случаев производится с наружным водяным охлаждением, что также снижает перегрев внешних слоев металла.

Разнообразные виды шовной сварки, встречаемые на практике, в основном различаются способом подвода сварочного тока (односторонний или двусторонний) и расположением роликов относительно свариваемых деталей (рис. 3.37). Двусторонняя шовная сварка аналогична двусторонней точечной (рис. 3.37, а-е). Вместо одного из роликов может быть применена оправка, плотно контактирующая с внутренней деталью (рис. 3.37, г). Для сварки неподвижных деталей кольцевым швом на плоскости используется верхний ролик, который вращается вокруг своей оси, а также вокруг оси шва (рис. 3.37, 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. 3.37, ж) и неподвижной шин, когда два ролика, к которым подведен ток, вращаются вокруг своих осей и катятся по деталям (рис. 3.37, з). При односторонней шовной сварке, как и при точечной, наблюдается шунтирование тока в деталь, контактирующую с роликами.

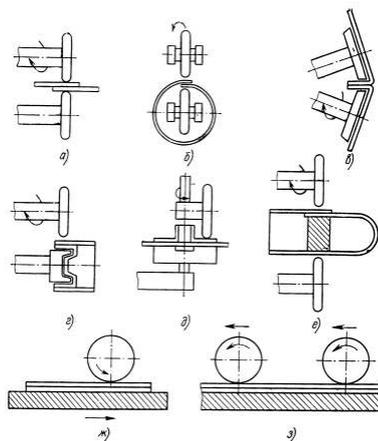


Рис. 3.37. Способы шовной сварки

3.6.3. Рельефная сварка

Рельефная сварка - способ, аналогичный точечной сварке, при котором детали обычно соединяются одновременно в нескольких точках. Положение этих точек определяется выступами - рельефами, образованными (штамповкой, обработкой резанием) на одной или обеих деталях. 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 и точечной сварке 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. 3.38, а). Для обеспечения одинаковых условий нагрева каждого рельефа необходимо, чтобы приложенное усилие $F_{эл}$ и ток I_2 (рис.3.38, б) равномерно распределялись между всеми точками контакта деталей ($F_{эл}, I_{св}$).

Рассмотрим процесс образования соединения. При сжатии деталей электродами из-за малой площади контакта рельефа с плоской деталью (рис. 3.38, 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 пойдет, минуя рельефы, через холодные участки металла, имеющие малое сопротивление, дальнейший нагрев рельефа резко уменьшится и соединение будет непрочным.

При правильно выбранном режиме сварки в результате теплового расширения металла в зоне соединения между деталями образуется некоторый зазор, препятствующий их случайному соприкосновению и появлению дополнительных (помимо рельефа) путей прохождения тока через детали. По мере протекания тока зона расплавления увеличивается в объеме, металл рельефа интенсивно 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.

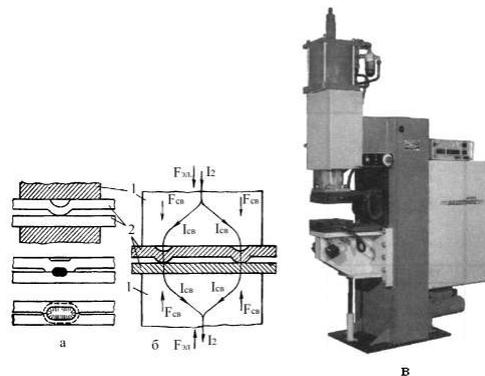


Рис. 3.38. Рельефная сварка: а - последовательность образования соединения; б - распределение токов и усилий; в - общий вид машины МР-8010

Разновидностью контактной сварки является точечная микросварка, которая предназначена для соединения разрядом конденсаторов навесных электрорадиоэлементов с токоведущими дорожками печатных плат. Для сварки используется машина (рис.3.39), представляющая собой комплекс, состоящий из монтажного стола, сварочной головки, сварочного трансформатора, предметного столика, источника питания и микроскопа МБС-10.

Сварочная головка снабжена гибким педальным приводом и 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, который имеет только вертикальное перемещение горизонтальной рабочей площадки, снабженное лимбом для установки гарантированного рабочего хода пружинных подвесок.

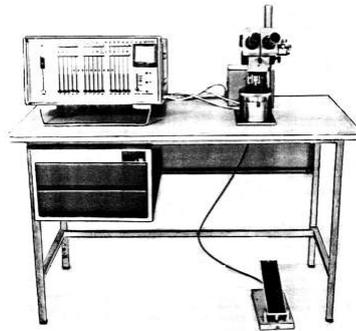


Рис. 3.39. Машина для контактной точечной микросварки

Источник питания типа И153 или И153.01 соединен проводами со сварочным трансформатором и микропереключателем, установленным в сварочной головке, и обеспечивает:

- зарядку рабочих конденсаторов до определенного уровня напряжения, определяемого технологией сварки;
- поддержание этого напряжения с заданной точностью на заданном уровне;
- последующий разряд рабочих конденсаторов на сварочный трансформатор.

3.6.4. Стыковая сварка

Стыковая сварка - способ, при котором 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.3.40). При нагреве и пластической деформации металла в зоне стыка часть элементарных частиц - зерен металла разрушается с одновременным образованием новых (общих для обеих деталей) зерен. Кроме того, обязательным условием получения надежного соединения является удаление пленки окислов на торцах деталей или ее разрушение.

Для сварки используется теплота, выделяемая в контакте между торцами 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 оплавлением.

Сварка сопротивлением - способ стыковой сварки, при котором ток включается после сжатия деталей 3 усилием, передаваемым губками машины 1, 2 (рис. 3.40, а). В начале процесса детали контактируют только по отдельным выступам, что и создает контактное сопротивление. После включения тока, благодаря его высокой плотности на выступах металл зоны контакта деталей интенсивно и под действием усилия выступы сминаются. Контактное сопротивление быстро уменьшается и 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. 3.40, б).

При стыковой сварке важной характеристикой процесса является вылет деталей из губок - установочная длина l_1 и l_2 (см. рис. 3.40, а). В связи с тем, что губки интенсивно отводят теплоту, температура в зоне стыка деталей, а следовательно, и 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.

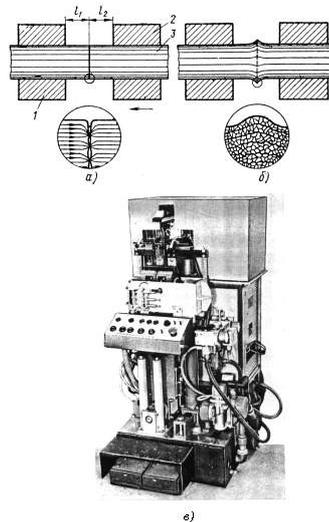


Рис. 3.40. Схема процесса стыковой сварки сопротивлением (а, б) и общий вид машины стыковой сварки К826 (в)

Сварка оплавлением - способ стыковой сварки, при котором торцы соединяемых деталей нагревают током до расплавления металла при их сближении 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. Таким образом, при сближении деталей непрерывно возникают и разрушаются контакты-перемычки с выбросом частиц и паров металла и образованием на торцах равномерного расплавленного слоя металла (рис. 3.41, а). При этом процессе, называемом оплавлением, уменьшается установочная длина деталей.

При сварке оплавлением контактное сопротивление к концу процесса оплавления 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 идет 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.

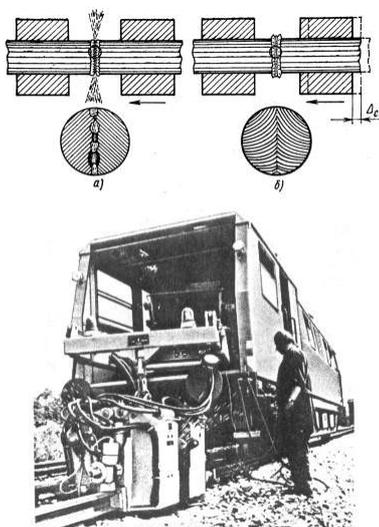


Рис. 3.41. Схема процесса (а, б) и машина для стыковой сварки оплавлением рельс (в)

При осадке расплавленный и перегретый металл с окислами 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. 3.41, б). В процессе оплавления и осадки существенно уменьшается установочная длина на величину припуска на сварку $\Delta_{св}$.

Для соединения деталей больших сечений с целью снижения электрической и механической мощности оборудования используют так называемую сварку оплавлением с подогревом, при которой концы деталей вначале нагревают аналогично сварке сопротивлением. Детали при подогреве периодически сжимают небольшим усилием, нагревают током, затем размыкают. После подогрева до определенной температуры торцы оплавляются и детали осаживаются.

3.7. Сварка токами высокой частоты

При сварке токами высокой частоты (ТВЧ) изделие перед сварочным узлом формируется в виде заготовки с V - образной щелью между свариваемыми кромками. К кромкам индуктором (рис. 3.42, а) или с помощью вращающегося контактного ролика (рис. 3.42, б) подводится ток высокой частоты таким образом, чтобы он проходил от одной кромки к другой через место их схождения.

Вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости, который по мере сближения кромок усиливается, достигается высокая концентрация тока в месте схождения кромок и происходит их разогрев. Нагретые кромки обжимаются валками и свариваются. Качество сварного соединения и расход электроэнергии связаны с особенностями протекания тока высокой частоты по проводникам.

При протекании тока по проводнику проявляется поверхностный эффект, заключающийся в неравномерном распределении переменного тока по сечению проводника. У наружной поверхности проводника наблюдается наибольшая плотность тока. При высокой частоте ток проходит лишь по тонкому поверхностному слою проводника.

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

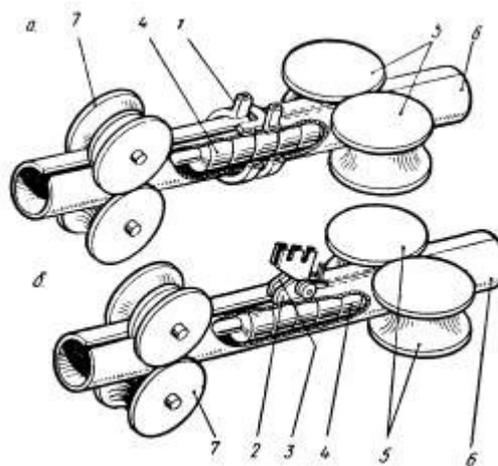


Рис.3.42. Схема высокочастотной сварки труб с индукционным (а) и контактным (б) способами подвода тока: 1 - индуктор; 2 и 3 - контакты; 4 - ферритовый стержень; 5 - сжимающие ролики; 6 - труба; 7 - направляющий ролик

При протекании переменного тока в системе проводников, расположенных таким образом, что каждый из них находится не только в собственном переменном магнитном поле, но и в поле других проводников, проявляется эффект близости: ток по периметру проводников располагается таким образом, что его плотность в близлежащих точках проводников максимальная, а в наиболее

удаленных - минимальная. Чем меньше расстояние между осями проводников и чем больше радиус сечения проводника, тем сильнее проявляется эффект близости.

Если поместить проводящее тело в переменное магнитное поле соленоида или расположить его рядом с индуктором, включенным в цепь переменного тока, то в этом теле индуцируются замкнутые в нем вихревые токи обратного направления (по отношению к току в индукторе). В этом случае также проявляются эффекты, способствующие сосредоточению тока у поверхности проводника и в зонах, близких к индуктору.

Тепловыделение в проводнике пропорционально квадрату плотности тока, и при быстро протекающих сварочных процессах, когда теплоотдача не оказывает решающего влияния на температурное поле, степень неравномерности нагрева может быть значительно выше, чем неравномерности распределения тока. Поэтому высокочастотный нагрев неэффективен для сварки деталей большого диаметра и толстостенных труб.

Процессы высокочастотной сварки можно разделить на три группы: сварка давлением с оплавлением, сварка давлением без оплавления и сварка плавлением без давления.

Сварка давлением с оплавлением осуществляется при предварительном нагреве и местном расплавлении свариваемых поверхностей. Для получения качественного сварного соединения необходимо, чтобы весь оплавленный металл, имеющийся в месте схождения свариваемых элементов, был удален при осадке. Этот процесс реализуется в том случае, если скорость осадки будет достаточной и расплавленный металл не потеряет свойства жидкотекучести. Сварное соединение образуется между поверхностями, находящимися в твердом состоянии. Скорость нагрева достигает $15 \cdot 10^4$ °C/с; осадка - 0,15 - 1,5 мм; скорость осадки - 2000 мм/с. Этот способ нашел наиболее широкое распространение при производстве сварных конструкций из черных и цветных металлов. Схемы свариваемых элементов приведены на рис. 3.43.

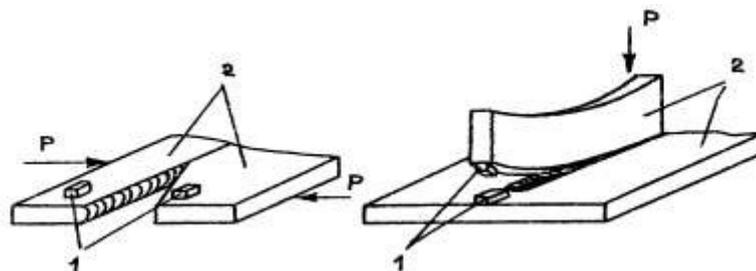


Рис.3.43. Примеры схем выполнения высокочастотной сварки давлением с оплавлением: 1 - места подвода тока; 2 - свариваемые элементы

Расстояние от места токоподвода до места схождения кромок обычно лежит в пределах от 25 до 300 мм. На этом отрезке осуществляется нагрев свариваемых заготовок.

Сварка давлением без оплавления осуществляется с предварительным нагревом свариваемых поверхностей до температуры ниже точки плавления свариваемого металла. Скорость нагрева не превышает 400 °C/с; осадка - 2,5 - 6,0 мм; скорость осадки - 20 мм/с. Процесс сварки при отсутствии восстановительной среды может обеспечивать удовлетворительное качество соединения только в узком интервале температур и при деформациях, достаточных для разрушения оксидных пленок на свариваемых поверхностях.

Сварка плавлением (рис. 3.44) без давления осуществляется при нагреве свариваемых элементов до оплавления. Изделия, подлежащие сварке, плотно прилегают друг к другу отбортованными кромками, которые разогреваются и оплавляются с помощью индуктора. Ванна расплавленного металла застывает, образуя сварной шов без приложения давления.

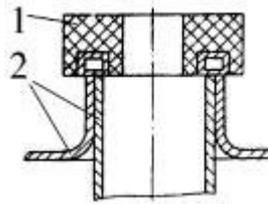


Рис.3.44. Схема высокочастотной сварки плавлением без давления:
1 - индуктор;
2 - свариваемые заготовки

Скорость нагрева 250 - 3000 °С/с, частота тока источника питания 70 и 440 кГц. Этот процесс целесообразно применять для деталей с толщиной стенки 0,3 - 1,5 мм с максимальной длиной сварного шва до 500 мм.

Высокочастотная сварка применяется для изготовления спиральношовных труб, приварке ребер к трубам (рис. 3.45), сварке биметаллических полос и т.п.

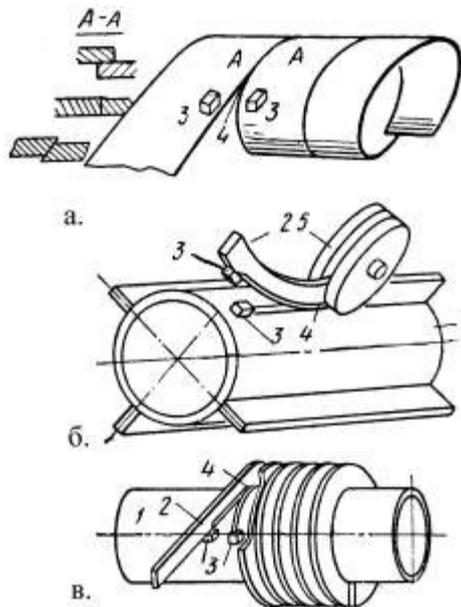


Рис.3.45. Схемы сварки спиральношовных труб (а) и приварки ребер (б, в):
1 - труба; 2 - ребро;
3 - контакты; 4 - зона формирования соединения; 5 - ролик

3.8. 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.

Холодной сваркой 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. Без пластической деформации в обычных атмосферных условиях, даже прилагая любые удельные сжимающие давления на соединяемые заготовки, практически невозможно получить полноценное монолитное соединение.

Роль деформации при холодной сварке 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. Оно также зависит от схемы деформации и способа приложения давления (статического, вибрационного).

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

Точечная сварка - наиболее простой и распространенный способ холодной сварки. Ее применение рационально для соединения алюминия, алюминия с медью, армирования алюминия медью. Она позволяет заменить трудоемкую клепку и контактную точечную сварку.

При точечной сварке (рис. 3.46, а) зачищенные детали 1 устанавливаются внахлестку между пуансонами 2, имеющими рабочую часть 3 и опорную поверхность 4. При вдавливании пуансонов сжимающим усилием P происходит деформация заготовок и формирование сварного соединения. Опорная часть пуансонов создает дополнительное напряженное состояние в конечный момент сварки, ограничивает глубину погружения пуансонов в металл и уменьшает коробление изделия.

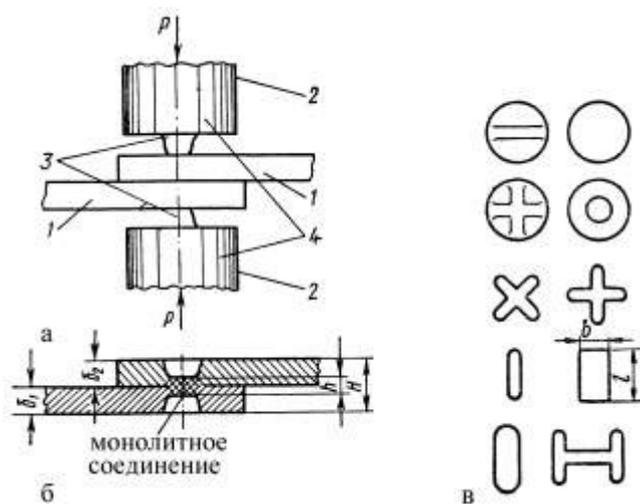


Рис.3.46. Схема холодной точечной сварки (а), геометрия сварного соединения (б) и применяемые формы пуансонов (в)

Прочность точек может быть повышена на 10-20 % при сварке по схеме (рис.3.47)

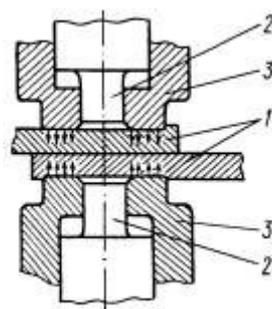


Рис.3.47. Схема холодной точечной сварки с предварительным обжатием

Свариваемые детали 1 предварительно сжимаются прижимами 3 или одновременно с вдавливанием пуансона 2. 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, связанные с созданием двух высоких давлений на малой поверхности и устранением затекания металла между пуансоном и прижимом. Этот способ позволяет сваривать низкопластичные материалы.

Ввиду простоты способа точечной холодной сварки, специальные машины для ее выполнения развития не получили. Сварку успешно выполняют на самых различных серийных прессах с

использованием кондукторов, надежно фиксирующих свариваемые заготовки, чтобы исключить их коробление (рис.3.48).

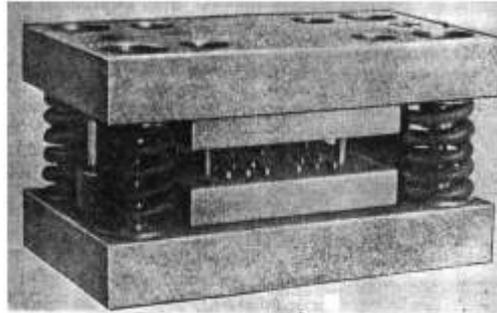


Рис.3.48. Приспособление для холодной точечной сварки

Холодная шовная (роликовая) сварка характеризуется непрерывностью монолитного соединения. По механической схеме эта сварка аналогична холодной сварке прямоугольными пуансонами (рис. 3.49).

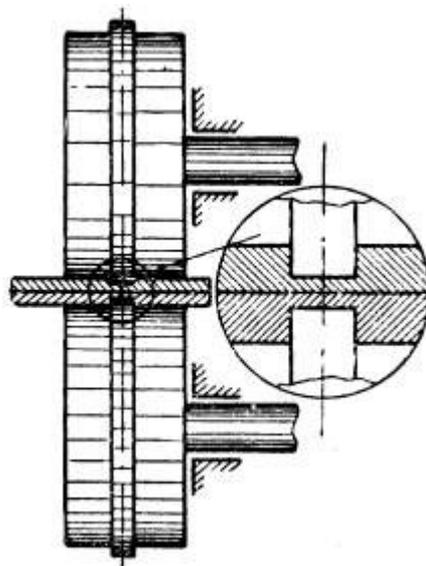


Рис.3.49. Схема холодной шовной сварки

Собранные заготовки 1 устанавливаются между роликами 2 и сжимаются ими до полного погружения рабочих выступов 3 в металл. Затем ролики приводятся во вращение. Перемещая изделие и последовательно внедряясь рабочими выступами в металл, они вызывают его интенсивную деформацию, в результате которой образуется непрерывное монолитное соединение - шов.

Шовная сварка бывает двусторонняя, односторонняя и несимметричная. Двусторонняя сварка выполняется одинаковыми роликами. При односторонней сварке один ролик имеет выступ, высотой равной сумме выступов при двусторонней сварке, а второй - является опорным, без рабочего выступа. При несимметричной сварке ролики имеют различные по размерам, а иногда и по форме рабочие выступы.

Односторонняя роликовая сварка чаще применяется при сварке разнородных металлов с большим отличием по твердости. Рабочая часть ролика вдавливается в более твердый металл. Такая сварка при прочих равных условиях обеспечивает более прочные швы и при сварке однородных металлов.

При роликовой сварке металл свободно течет вдоль оси шва. Это затрудняет создание достаточного напряженного состояния металла в зоне соединения. Поэтому для достижения провара требуется большая пластическая деформация (на 2 - 6 %), чем при точечной сварке. Напряженное состояние в зоне роликовой сварки можно повысить, увеличивая диаметр роликов. Обычно диаметр ролика близок к $50d$, ширина рабочего выступа $(1 - 1,5)d$, высота $(0,8 - 0,9)d$, 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.3.50). При сварке тонких пластичных металлов применяются ручные настольные станки.

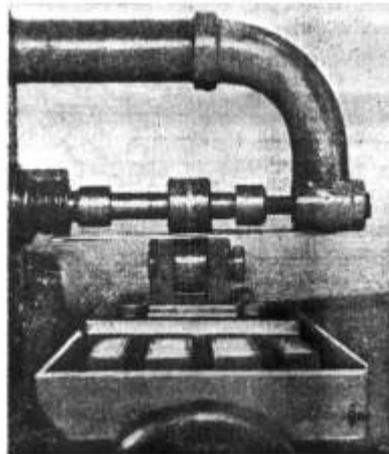


Рис.3.50. Холодная роликовая сварка на фрезерном станке

Одна из первых схем холодной стыковой сварки металлов, которая не потеряла практического значения до сих пор, приведена на рис. 3.51. Эта схема сварки разработана 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 торцев, детали 4 устанавливаются в зажимы 2, которые имеют формирующие части с режущими кромками 5 и упором 6. Осадочное усилие прикладывается к ползуну 3, при его перемещении сжимаются торцы деталей и зажимаются с помощью конусов. В процессе осадки углубления 7 заполняются металлом раньше, чем встречаются опорные части 6. Поэтому, когда встречаются опорные части, 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.

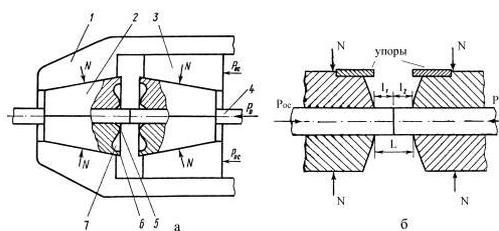


Рис. 3.51. Схемы холодной стыковой сварки

Схема стыковой сварки, предложенная С.Б. Айбиндером, приведена на рис. 3.51, б.

Процесс холодной стыковой сварки чисто механический, он удобен для автоматизации. В ИЭС им. Е. О. Патона разработан полуавтомат, который используется в условиях поточного производства. В этой установке оператор производит только укладку деталей в ручки зажимов, а операции зажатия, отрезки концов, осадку, перехват в случае повторной осадки, вторую осадку, удаление грата, раскрытие зажимов и выталкивание производится автоматически. Полуавтомат позволяет сваривать алюминиевую проволоку сечением до 90 мм² и медную - сечением до 30 мм².

3.9. 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.

Сварка взрывом - процесс получения соединения под действием энергии, выделяющейся при взрыве заряда взрывчатого вещества (ВВ). Принципиальная схема сварки взрывом приведена на рис. 3.52. Неподвижную пластину (основание) 4 и метаемую пластину (облицовку) 3 располагают под углом $\alpha = 2 - 16^\circ$ на заданном расстоянии $h = 2 - 3$ мм от вершины угла. На метаемую пластину укладывают заряд 2 ВВ. В вершине угла устанавливают детонатор 1. Сварка производится на опоре 5.

После инициирования взрыва детонация распространяется по заряду ВВ со скоростью D нескольких тысяч м/с.

Под действием высокого давления расширяющихся продуктов взрыва метаемая пластина приобретает скорость V_n порядка нескольких 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 толщины 1 - 15 мкм.

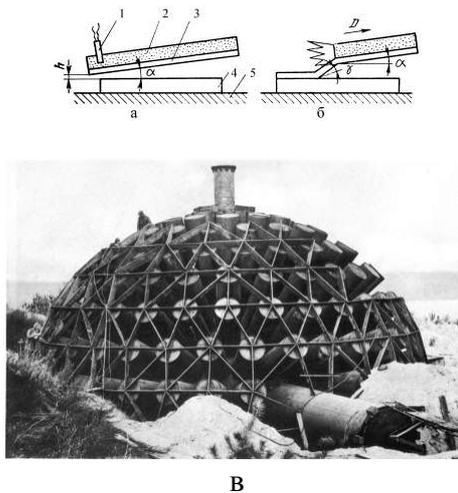


Рис.3.52. Угловая схема сварки взрывом до начала (а) и в стадии взрыва (б), а также общий вид камеры для сварки взрывом (в)

Соударение метаемой пластины и основания сопровождается пластической деформацией, вызывающей местный нагрев поверхностных слоев металла.

В результате деформации и нагрева происходит развитие физического контакта, активация свариваемых поверхностей и образование соединения.

Исследование пластической деформации в зоне соударения по искажению координатной сетки показало, что прочное соединение образуется только там, где соударение сопровождается взаимным сдвигом поверхностных слоев метаемой пластины и основания. Там же, где взаимный сдвиг отсутствовал, и в частности в зоне инициирования взрыва, прочного соединения не было получено. 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 полностью не исключают вредного влияния таких загрязнений.

Сварка взрывом дает возможность сваривать практически любые металлы. Однако последующий нагрев сваренных заготовок может вызвать интенсивную диффузию в зоне соединения и образование интерметаллидных фаз. Образование интерметаллидов приводит к снижению прочности соединения, которая при достаточно высоких температурах 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 используют в качестве промежуточного материала ниобий, ванадий или тантал.

Сварка взрывом применяется для плакирования стержней и труб, внутренних поверхностей цилиндров и цилиндрических изделий (рис.3.53).

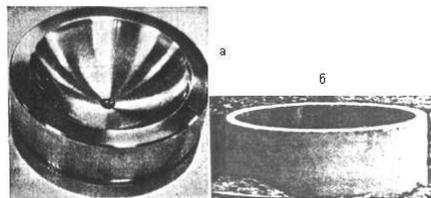


Рис.3.53. Плакированные взрывом подпятник прессы (а) и обечайка диаметром 4000 мм (б).

При плакировании внутренних поверхностей используется схема (рис. 3.54, б). Она предусматривает размещение плакируемой трубы 1 в массивной матрице 2. Внутри трубы 1 с зазором устанавливается плакирующая труба 3 с зарядом ВВ 4, инициируемого детонатором 5.

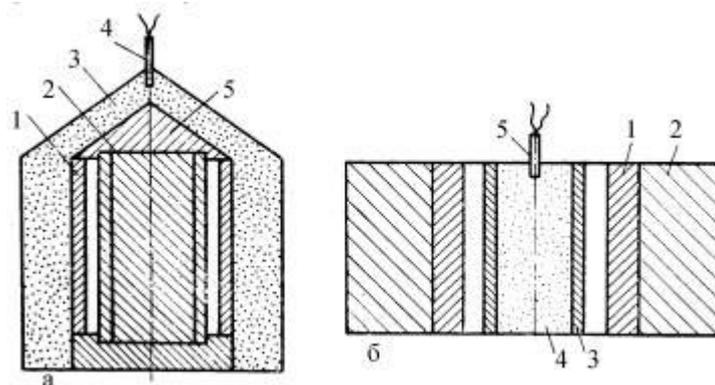


Рис.3.54. Схема плакирования взрывом стержня (а) и внутренней поверхности трубы (б)

Для внутреннего плакирования крупногабаритных труб и цилиндрических изделий ответственного назначения применяют вместо массивной матрицы 2 дополнительный заряд, расположенный на наружной поверхности плакируемого цилиндра и взрываемый одновременно с внутренним зарядом.

В современных процессах металлообработки взрывом применяют заряды ВВ 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.

3.10. Магнитно-импульсная сварка

Магнитно-импульсная обработка металлов основывается 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 непосредственно преобразуется в механическую, и импульс давления магнитного поля действует непосредственно на заготовку без участия какой-либо передающей среды.

В установку для магнитно-импульсной сварки (рис. 3.55) 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 устанавливаются внахлестку под углом друг к другу с зазором между ними. Индуктор 4 устанавливается 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, индуктирующее в этой заготовке ток. Взаимодействие тока индуктора с индуктированным током 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 развиваются высокие давления, и образуется сварное соединение.

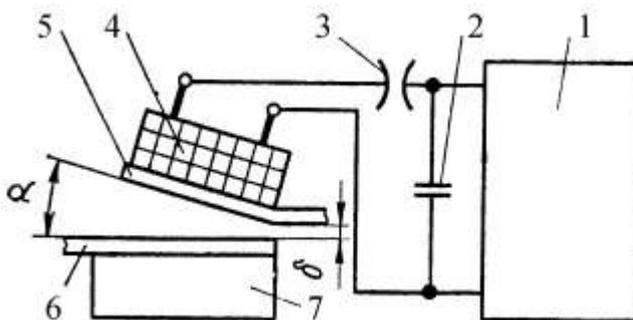


Рис.3.55. Принципиальная схема магнитно-импульсной сварки

При магнитно-импульсной сварке давление на μεταаемый элемент передается мгновенно (со скоростью распространения магнитного поля) и движение сообщается не отдельным участкам, как при сварке взрывом, а всей μεταаемой детали. Для обеспечения последовательного перемещения зоны контакта при сварке детали устанавливаются свариваемыми поверхностями под углом друг к другу, μεταаемая деталь перед сваркой обрабатывается "на ус" и т.п. Соединение, как и при сварке взрывом, образуется в результате косоого 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 и между параллельно расположенными поверхностями. При этом вследствие рассеяния магнитного поля на концах индуктора распределение давления вдоль образующей μεταаемого элемента неравномерное - меньше по концам и больше в средней части. При таком нагружении первоначально прямолинейный μεταаемый элемент, перемещаясь к моменту встречи с неподвижной деталью, становится выпуклым, и плоское соударение переходит в косоое, распространяющееся в общем случае в двух противоположных направлениях от зоны начального контакта.

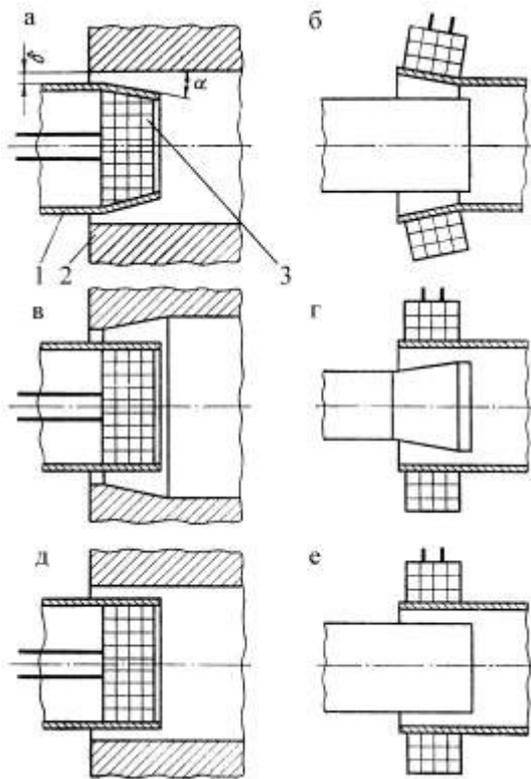


Рис.3.56. Схемы осуществления магнито-импульсной сварки:
 1,2 - свариваемые заготовки;
 3 - индуктор

Существует три основных схемы магнито-импульсной сварки: обжатием трубчатых заготовок с использованием индуктора, охватывающего заготовку (рис. 3.56, а, б, в); раздачей трубчатых заготовок с использованием индуктора, помещенного внутрь заготовки (рис.3.56, г, д, е); деформированием листовых заготовок плоским индуктором (рис. 3.55.). Для предотвращения деформации тонкостенных элементов в процессе сварки внутри трубы 1 (рис. 1.19,а, б, в) вставляют металлическую оправку, удаляемую 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.

Целесообразной областью применения этого способа является получение всевозможных соединений трубчатых деталей между собой и с другими деталями, а также плоских деталей по наружному и внутреннему контуру. Магнито-импульсным способом можно сваривать практически любые материалы в однородном и разнородном сочетаниях. Диапазон толщин метаемых деталей составляет 0,5 - 2,5 мм (рис.3.57).



Рис.3.53. Плакированные взрывом подпятник прессы (а) и обечайка диаметром 4000 мм (б).

Одной из основных проблем расширения области применения магнито-импульсной сварки является получение сильных импульсных магнитных полей при высокой стойкости индуктора. Эта задача решается созданием новых и совершенствованием существующих конструкций индукторов, применением высокопрочных материалов как для токопроводов, так и для элементов механического усиления, разработкой новых схем магнито-импульсных установок.

3.11. 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 тепла при трении рассматривается как вредное явление и с ним, за исключением редких случаев, ведется борьба. Одним из примеров полезного использования тепла, выделяющегося при трении, является процесс получения неразъемного соединения, названный сваркой трением.

Сварка трением является разновидностью сварки давлением, при которой механическая энергия, подводимая к одной из свариваемых деталей, преобразуется в тепловую, при этом генерирование тепла происходит непосредственно в месте будущего соединения.

Тепло может выделяться при вращении одной детали относительно другой (рис. 3.58, а), вставки между деталями (рис. 3.58, б, в), при возвратно-поступательном движении деталей в плоскости стыка относительно малыми амплитудами Δ и при звуковой частоте (рис. 3.58, г) и т.д. Детали при этом прижимаются постоянным или возрастающим во времени давлением P . Сварка завершается осадкой и быстрым прекращением вращения.

В зоне стыка при сварке протекают следующие процессы. По мере увеличения частоты вращения свариваемых заготовок при наличии сжимающего давления происходит притирка контактных поверхностей и разрушение жировых пленок, присутствующих на них в исходном состоянии. Граничное трение уступает место сухому. В контакт вступают отдельные микровыступы, происходит их деформация и образование ювенильных участков с ненасыщенными связями поверхностных атомов, между которыми мгновенно формируются металлические связи и немедленно разрушаются вследствие относительного движения поверхностей.

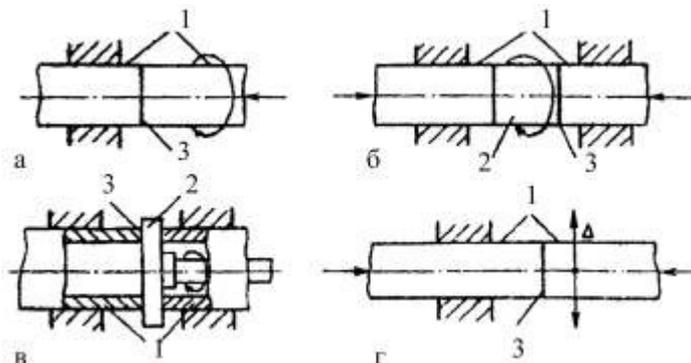


Рис.3.58. Схемы процесса сварки трением: 1 - свариваемые детали; 2 - вставка; 3 - зона сварки

Этот процесс происходит непрерывно и сопровождается увеличением фактической площади контакта и быстрым ростом 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 как бы роль смазочного материала. Трение из сухого становится как бы граничным. Под действием сжимающего усилия происходит вытеснение металла из стыка и сближение свариваемых поверхностей (осадка). Контактные поверхности оказываются подготовленными к образованию сварного соединения: металл в зоне стыка обладает низким сопротивлением высокотемпературной деформации, оксидные пленки утонены, 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.

Особенностью сварки трением является ограничение применения этого способа соединения формой и размерами 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. 3.59): стержни встык, трубы встык, стержень встык с трубой, Т - образное соединение стержня или трубы и детали с плоской поверхностью.

Возможности применения сварки трением ограничиваются не только формой, но и размерами сечения свариваемых деталей в месте их сопряжения. Так, сваривать стержни диаметром более 200 мм нецелесообразно, потому что для реализации этого процесса потребовались бы машины с двигателями мощностью порядка 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.

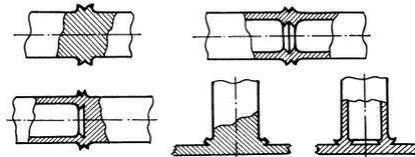


Рис. 3.59. Типы сварных соединений, выполненных сваркой трением

Не удастся сварить даже в лабораторных условиях и стержни диаметром менее 3,5 мм, для которых нужна установка со скоростью вращения шпинделя порядка 200 с^{-1} и сложным устройством для осуществления мгновенного его торможения.

Расчеты и опыт практического применения сварки трением показывают, что ее пока целесообразно применять для сварки деталей диаметром от 6 до 100 мм.

Наиболее эффективно применение сварки трением в сфере изготовления режущего инструмента при производстве составных сварно-кованых, сварно-литых или сварно-штампованных деталей. Она оказывается незаменимой при соединении трудносвариваемых или вовсе не сваривавшихся другими способами разнородных материалов, например, стали с алюминием, аустенитных сталей с перлитными и т.п.

Эффективно применение сварки трением и для соединения пластмассовых заготовок.

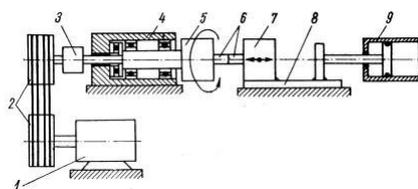


Рис.3.60. Принципиальная конструктивно-кинематическая схема машины для сварки трением.

Машины для сварки трением обычно содержат в себе следующие основные узлы (рис. 3.60): привод вращения шпинделя 1 с ременной передачей 2; фрикционная муфта 3 для сцепления шпинделя с приводным устройством; тормоз 4 для торможения шпинделя; два зажима для крепления свариваемых заготовок 7; передняя бабка 5 со шпинделем, несущим на себе вращающийся зажим 6; задняя бабка 8 с неподвижным зажимом; пневматические или гидравлические цилиндры 9, обеспечивающие создание необходимого рабочего (осевого) давления машины; пневматическая, пневмогидравлическая или гидравлическая схема управления силовым приводом машины; шкаф управления. В большинстве машин в состав привода вращения входят трехфазный асинхронный электродвигатель, клиноременная передача с зубчатым ремнем. В машинах для микро- и прецизионной сварки, шпиндель которых должен развивать очень высокую частоту вращения ($80 - 650 \text{ с}^{-1}$), 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.3.61 приведен общий вид установки сварки трением с последующим удалением грата в автоматическом режиме автомобильных выпускных клапанов.

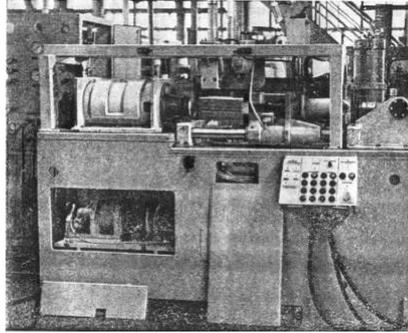


Рис.3.61. Установка СТ110 для сварки трением

Мировой опыт использования сварки трением позволяет сделать вывод о том, что этот вид сварки является одним из наиболее интенсивно развивающихся технологических процессов, особенно в странах с высоким уровнем развития промышленности.

Некоторые примеры применения сварки трением приведены на рис.3.62.

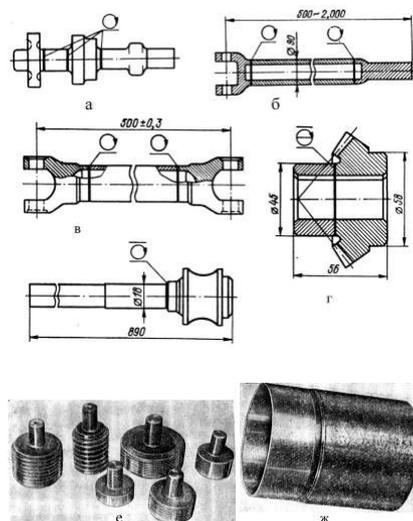


Рис.3.62. Примеры применения сварки трением:

а - промежуточный вал коробки передач автомобиля; б - карданный вал тяжёлого грузового автомобиля; в - карданный вал автомобиля "Форд"; г - коническое зубчатое колесо с удлинённой ступицей; д - вал рулевого управления легкового автомобиля; е - гладкие и резьбовые калибры; ж - сталеалюминиевый трубчатый переходник диаметром 90 мм с толщиной стенки 4 мм

3.12. Ультразвуковая сварка

Соединение при этом способе сварки образуется под действием ультразвуковых (с частотой 20 - 40 кГц) колебаний и сжимающих давлений, приложенных к свариваемым деталям.

Ультразвуковые колебания в сварочных установках получают следующим образом. Ток от ультразвукового генератора (рис.3.63) подаётся на обмотку магнитострикционного преобразователя (вибратора), который собирается из пластин толщиной 0,1 - 0,2 мм. Материал, из которого они изготовлены, способен изменять свои геометрические размеры 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, в то время как ступенчатые, конические

концентраторы усиливают их. Размеры и форму концентратора рассчитывают с учётом необходимого коэффициента усиления. Как правило, достаточен коэффициент 5, обеспечивающий амплитуду колебаний рабочего выступа при холостом ходе 20 - 30 мкм. Размеры волноводной системы подбираются так, чтобы в зоне сварки был максимум амплитудного значения колебаний (кривая упругих колебаний, рис.3.63).

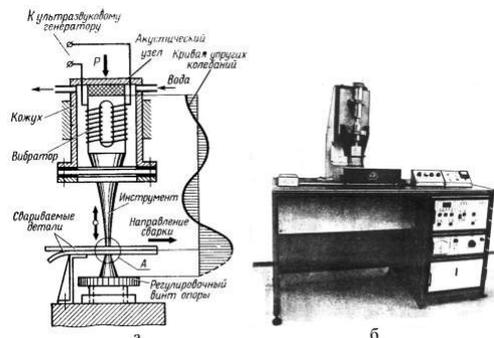


Рис.3.63. Ультразвуковая сварка: а - схема осуществления процесса; б - установка ультразвуковой сварки

При этом методе сварки колебательные движения ультразвуковой частоты разрушают неровности поверхности (рис.3.64) и оксидный слой. Совместное воздействие на соединяемые детали механических колебаний и относительно небольшого давления сварочного волновода - инструмента обеспечивает течение металла в зоне соединяемых поверхностей без внешнего подвода тепла. За счет трения, вызванного возвратно-поступательным движением сжатых контактирующих поверхностей, происходит нагрев поверхностных слоев материалов. Трение не является доминирующим источником теплоты при сварке, например, металлов, но его вклад в образование сварного соединения является существенным.

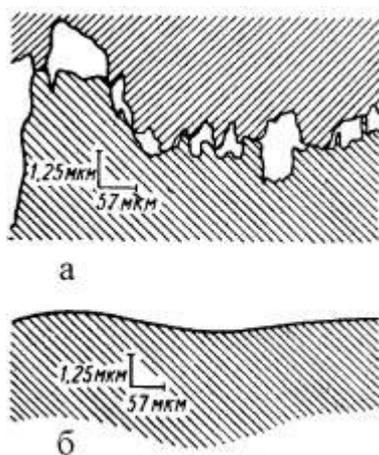


Рис.3.64. Профиль поверхности: а - двух собранных медных деталей перед ультразвуковой сваркой; б - нижней детали после воздействия ультразвука

Ультразвуковая сварка (УЗС) может применяться для соединения металла небольших толщин, широко используется для сварки полимерных материалов. При сварке полимеров ультразвуковые колебания подаются волноводом перпендикулярно соединяемым поверхностям, и под их воздействием возникает интенсивная диффузия - перемещение макромолекул из одной соединяемой части в другую.

Разработан процесс УЗС костных тканей в живом организме, основанный на свойстве ультразвука ускорять процесс полимеризации некоторых мономеров. Так, циакрин, представляющий собой этиловый эфир цианакриловой кислоты, под действием ультразвука образует твёрдый полимер в течение десятков секунд, в то время как без ультразвука процесс полимеризации идёт несколько часов. Это явление и легло в основу соединения, или сварки, обломков костной ткани между собой с помощью циакрина, смешанного с костной стружкой. Циакрин затвердевает и прочно соединяется с

костной тканью, проникая в её капилляры под действием ультразвуковых колебаний. В результате получается прочное соединение отдельных частей кости между собой.

УЗС позволяет решить проблему присоединения к кристаллам кремния полупроводниковых приборов алюминиевых проводников-выводов, которыми осуществляется подключение приборов к внешним электрическим цепям. Диапазон геометрических размеров контактных площадок полупроводниковых приборов очень широк - от нескольких микронов у интегральных схем и дискретных транзисторов до 400 - 700 мкм у мощных транзисторов и диодов. Присоединение выводов - наиболее трудоёмкая операция во всём цикле изготовления приборов.

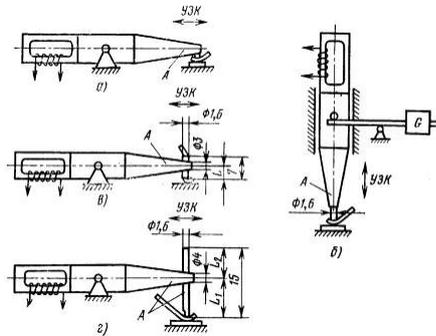


Рис.3.65. Схемы выполнения процесса УЗС с использованием продольной (а, б) и продольно-поперечной (в, г) колебательных систем

Разработано несколько вариантов ультразвуковой сварки кристаллов с выводами: с использованием продольной, поперечной, продольно-поперечной и крутильной колебательных систем (рис.3.65).

3.13. Сварка прокаткой

Сварка прокаткой - высокопроизводительный технологический процесс, используемый для получения биметаллов как из разнородных металлов, так и из металлов, близких по химическому составу, но отличающихся 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. 3.66, а), двойные симметричные пакеты - для получения двух листов биметалла (рис. 3.66, б) и тройные пакеты для получения трех листов биметалла, два из которых двухслойные, а один трехслойный (рис. 3.66, в).

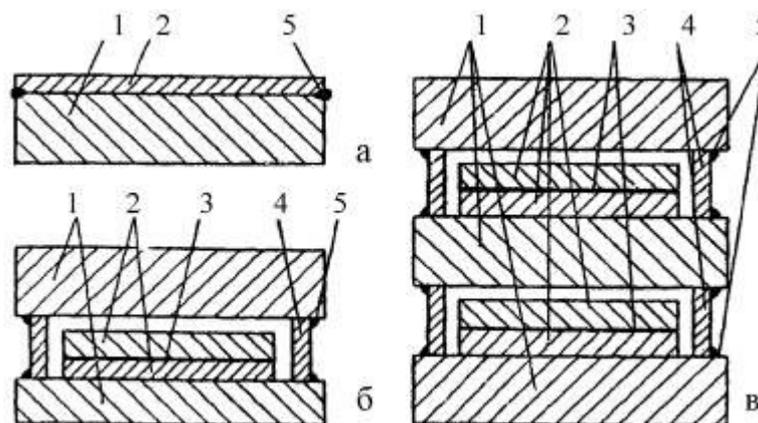


Рис.3.66. Конструкции пакетов для сварки прокаткой: 1 - основной слой; 2 - плакирующий слой; 3 - разделительный слой; 4 - технологическая планка; 5 - сварной шов

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 используют 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 с размещенным внутри пакета пиррофорным материалом церием, который при нагреве пакета сгорает и связывает кислород окружающей среды. Надежное соединение в процессе горячей прокатки легко окисляющихся металлов достигается при использовании вакуумных прокатных станов.

Пакеты прокатывают (рис. 3.67) на обычных прокатных станах, используемых для получения однослойных листов аналогичных размеров.

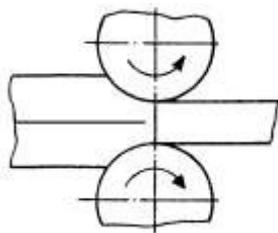


Рис.3.67. Схема сварки прокаткой

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 контактных поверхностей из-за значительной вытяжки, приводящей к утончению и частичному разрушению оксидных пленок. В отдельных местах контактирования между свариваемыми поверхностями образуются участки схватывания, между которыми остаются полости, содержащие газы. Возможность дальнейшего увеличения числа и площади участков схватывания определяется развитием 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.

3.14. Диффузионная сварка

Отличительной особенностью диффузионной сварки от других способов сварки давлением является применение относительно высоких температур нагрева ($0,5-0,7 T_{пл}$) и сравнительно низких удельных сжимающих давлений ($0,5-0$ 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 могут быть применены газы - восстановители, расплавы солей; флюсы, обмазки, но в большинстве случаев используют вакуум или инертные газы.

Очистка поверхностей металлов от оксидов может происходить 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.

Расчет и эксперимент 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, обусловленных приложением внешних сжимающих напряжений и нагревом металла.

В процессе деформации свариваемых поверхностей, свободных от оксидов, происходит их активация и при развитии физического контакта между такими поверхностями реализуется их схватывание.

При диффузионной сварке одноименных металлов сварное соединение достигает равнопрочности основному материалу в том случае, когда структура зоны соединения не отличается от структуры основного материала. Для этого в зоне контакта должны образовываться общие для соединяемых материалов зерна. Это возможно за счет миграции границ зерен, осуществляемой либо путем рекристаллизации обработки, либо путем собирательной рекристаллизации.

С помощью диффузионной сварки в вакууме получают высококачественные соединения керамики с коваром, медью, титаном, жаропрочных и тугоплавких металлов и сплавов, электровакуумных стёкол, оптической керамики, сапфира, графита с металлами, композиционных и порошковых материалов и др.

Соединяемые заготовки могут быть весьма различны по своей форме и иметь компактные (рис. 3.68, а - в) или развитые (рис. 3.68, г - и) поверхности контактирования. Геометрические размеры свариваемых деталей находятся в пределах от нескольких микрон (при изготовлении полупроводниковых приборов) до нескольких метров (при изготовлении слоистых конструкций).

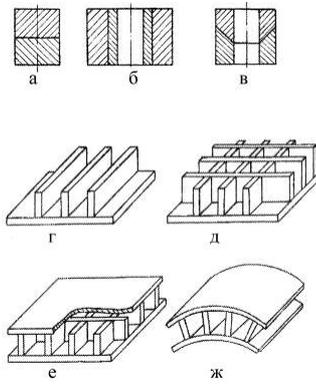


Рис. 3.68. Некоторые типы конструкций, получаемых диффузионной сваркой

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. После этого 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.

В зависимости от напряжений, вызывающих деформацию металла в зоне контакта и определяющих процесс формирования диффузионного соединения, целесообразно условно различать 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, снабжённой вакуумной камерой и нагревательным устройством (рис.3.69)

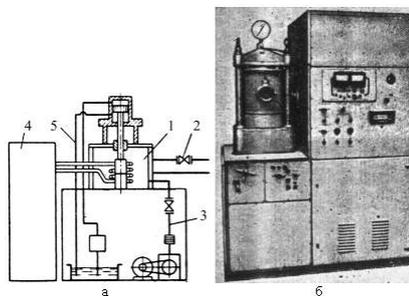


Рис.3.69. Принципиальная схема (а) и общий вид установки для диффузионной сварки: 1 - вакуумная камера; 2 - система охлаждения камеры; 3 - вакуумная система; 4 - высокочастотный генератор; 5 - гидросистема прессы

Но такие установки позволяют сваривать детали ограниченных размеров (как правило, диаметром до 80 мм (рис.3.68, а - в)).

При изготовлении крупногабаритных двухслойных конструкций (рис.3.68, г, д) используют открытые прессы. При этом свариваемые детали перед помещением в пресс собирают в герметичные контейнеры, которые вакуумируют и нагревают до сварочной температуры (рис. 3.70).

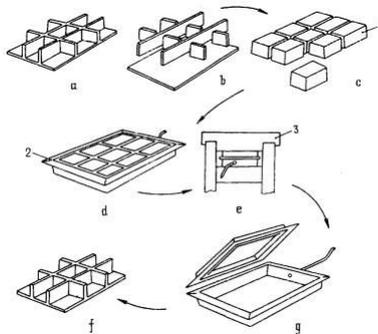


Рис. 3.70. Технологическая схема диффузионной сварки с высокоинтенсивным силовым воздействием: а - требуемая конструкция; б - заготовки для сварки; с - технологические элементы-вкладыши; д- сборка; е - сварка в процессе; г - демонтаж; т - готовая конструкция. 1 - технологические вкладыши; 2 - технологический контейнер; 3 - пресс

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 с использованием для заполнения "пустот" (межреберных пространств) технологических вкладышей и блоков (рис. 3.70), которые после сварки демонтируют или удаляют химическим травлением.

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 (рис.3.68, е, ж) перспективна диффузионная сварка с низкоинтенсивным силовым воздействием, при которой допустимые сжимающие усилия ограничены устойчивостью тонкостенных элементов. При этом способе диффузионной сварки не требуется создания сложного специализированного оборудования.

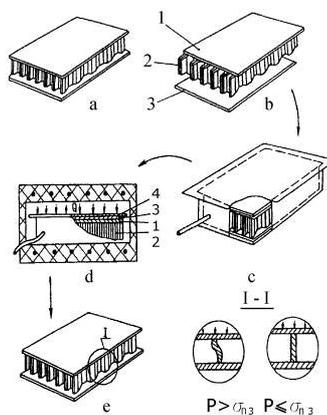


Рис. 3.71. Технологическая схема диффузионной сварки с низкоинтенсивным силовым воздействием плоских конструкций: а - требуемая конструкция; б - заготовки для сварки; с - сборка; д - сварка; е - готовая конструкция. 1 - несущая обшивка; 2 - готовый наполнитель; 3 - технологические листы; 4 - мембрана

При изготовлении плоских (или с большим радиусом кривизны) конструкций сжимающее усилие наиболее просто может быть обеспечено за счет атмосферного давления воздуха Q на внешнюю поверхность технологической оснастки при понижении давления газа в зоне соединения (рис. 3.71). Наличие технологических элементов (прокладок, мембран и т.д.), обладающих локальной жесткостью и помещенных с внешней стороны свариваемых элементов, исключает возможность потери устойчивости обшивок в виде прогибов неподкрепленных участков. Величина сварочного давления P ограничивается предельным напряжением потери устойчивости наполнителя $\sigma_{пз}$ ($P \leq \sigma_{пз}$).

При изготовлении конструкций сложного криволинейного профиля может быть использована технологическая схема (рис. 3.72), при которой давление нейтрального газа воспринимается непосредственно внешними элементами самой конструкции (несущими обшивками, оболочками и т.д.).

В процессе сварки обшивки на неподкрепленных участках под давлением газа деформируются (прогибаются). Это, с одной стороны, ухудшает условия для формирования соединения, а с другой стороны, 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 ($P \leq \sigma_{no}$).

В ряде случаев можно исключить применение внешнего давления для сжатия свариваемых заготовок, используя явления термического напряжения, возникающего при нагреве материалов с различными коэффициентами линейного расширения. При сварке коаксиально собранных заготовок коэффициент линейного расширения охватывающей детали должен быть меньше коэффициента линейного расширения охватываемой детали (рис.3.68, б).

Качество соединения при диффузионной сварке в вакууме определяется комплексом технологических параметров, основными из которых являются температура, давление, время выдержки.

Диффузионные процессы, лежащие в основе формирования сварного соединения, являются термически активируемыми, поэтому повышение температуры сварки стимулирует их развитие.

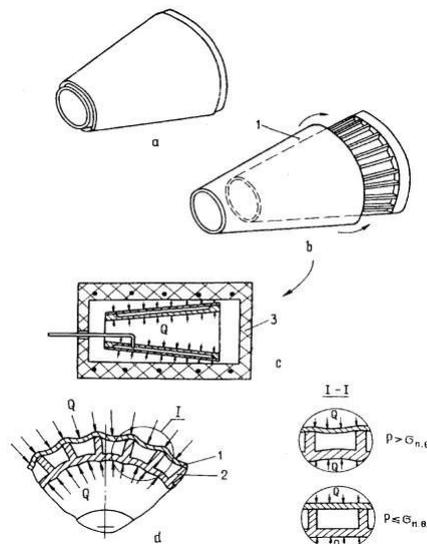


Рис. 3.72. Технологическая схема диффузионной сварки с низкоинтенсивным силовым воздействием конструкций сложной формы: а - требуемая конструкция; б - заготовки для сварки; с - сварка; д - характер деформации элементов конструкции при сварке.
1 - внешняя оболочка; 2 - внутренняя оболочка

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.

Величина удельного давления влияет на скорость образования диффузионного соединения и величину накопленной деформации свариваемых заготовок. В большинстве случаев, чем выше удельное давление, тем меньше время сварки и больше деформация. Так, при сварке в прессе с использованием высоких удельных давлений (до нескольких десятков МПа) время образования

соединения может измеряться секундами, а деформация металла в зоне соединения десятками процентов. При сварке с использованием низких удельных давлений (десятые доли МПа), 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.

Для осуществления диффузионной сварки в настоящее время создано свыше 70 типов сварочных диффузионно-вакуумных установок.

Разработка и создание установок для диффузионной сварки в настоящее время 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.3.73.

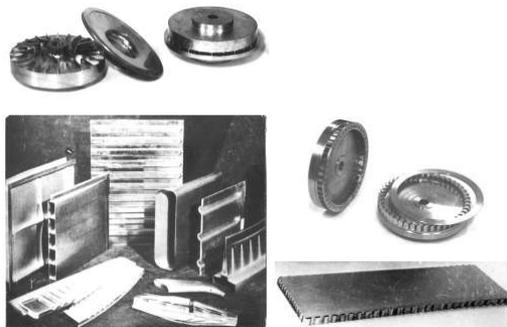


Рис.3.73. Примеры титановых конструкций, изготовленных диффузионной сваркой

3.15. Пайка

Быстрое развитие техники в различных отраслях промышленности обусловило широкое применение пайки, особенно в машиностроении, электронике и электротехнической промышленности. Это связано, во-первых, с 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, это объясняется все большим внедрением в производство новых конструкционных материалов и переходом на высоколегированные сплавы, сварка которых вызывает значительные трудности.

Сущность пайки заключается в создании жидкой прослойки из расплавленного припоя между паяемыми твердыми поверхностями. Жидкий припой смачивает поверхности и растекается в тонком зазоре между паяемыми деталями, а после кристаллизации образует паяный шов, в котором между поверхностными атомами (ионами) соединяемых заготовок и припоя формируются химические (металлические) связи.

Процесс пайки осложняет наличие на поверхности металлов оксидных и других слоев, препятствующих растеканию припоя по зазору между деталями. Жидкий металл припоя также подвергается окислению с поверхности и не растекается по паяемым металлическим поверхностям: получается непропай, являющийся дефектом соединения.

Только такие металлы, как золото, и, отчасти, серебро, можно паять без применения флюсов для снятия оксидных слоев. Это свойство золота используют в приборостроительном производстве: 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 следует тщательно удалять, так как может возникнуть коррозия, и паяное соединение начнет разрушаться.

Следует отметить, что 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, ухудшающие качество паяных соединений. Посторонние вещества с соединяемых поверхностей деталей и припоя перед пайкой удаляют химической или механической обработкой.

Преимущества флюсовой пайки - возможность осуществлять процесс в обычной атмосфере, применять универсальное оборудование и инструмент (газопламенные горелки, паяльники).

Недостатки флюсовой пайки - агрессивность ряда флюсов; невозможность достаточно надежно удалять поверхностные оксиды некоторых металлов (например, оксиды титана); экологические проблемы - загрязнение атмосферы и сточных вод. В этой связи предпочтительной следует считать пайку без флюсов - в контролируемых атмосферах: в вакууме, аргоне, гелии.

В последнее время разрабатывают так называемые самофлюсующиеся припои, которые при высоких температурах пайки могут растворять свои оксиды, отнимая этим самым кислород от оксидов, образовавшихся на поверхности металла. Такие припои содержат в качестве раскислителей бор, алюминий и другие активные элементы.

Удалению оксидных пленок с поверхности металла содействует ультразвук (рис.3.74), нарушающий их сплошность, и это часто используют на производстве (например, при пайке алюминия ультразвуковыми паяльниками). Паяльник имеет магнитоотриктор (1), излучающий колебания, передающиеся наконечнику (2). Возбужденные в расплавленном припое колеблющимся наконечником кавитационные пузырьки (3) эффективно разрушают оксидные пленки (4). Обмотка магнитоотриктора подключается к высокочастотному генератору (5), вырабатывающему импульсы с частотой 15...20 КГц. Нагревается наконечник спиралью (6), через которую пропускается электрический ток. При лужении наконечник располагается как можно ближе к детали, не касаясь ее. Облуженные таким образом детали можно паять обычным электрическим паяльником без флюса с применением оловянно-цинковых или оловянно-свинцовых припоев.

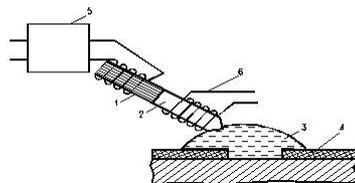


Рис.3.74. Схема пайки ультразвуковым паяльником

При изготовлении паяных изделий особенно важно качество сборки под пайку, при которой должны быть гарантированы зазоры для заполнения их жидким припоем. При широко применяемой так называемой капиллярной пайке используют способность жидкостей самопроизвольно подниматься в тонкие капилляры (трубочки) или плоские щели за счет сил поверхностного натяжения при наличии

смачивания жидкостью твердой поверхности. На рис. 3.75 приведена схема взаимодействия жидкости с твердой поверхностью щели или капилляра в зависимости от угла смачивания θ .

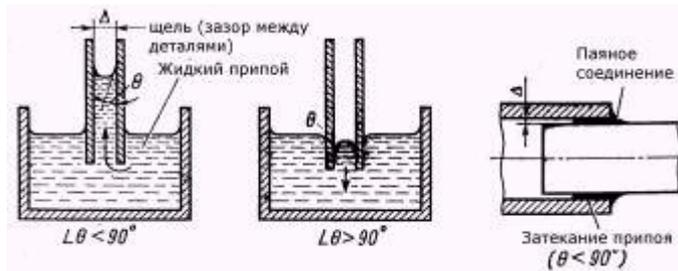


Рис.3.75. Явления смачивания при пайке: взаимодействие жидкого припоя с твердой поверхностью щели или капилляра при наличии (а) и отсутствии (б) смачивания, а также схема образования паяного соединения (в)

Если зазоры оставлены большие, то припой не будет в них затекать, и будут получаться непропаи, т. е. низкое качество паяного шва. Наоборот, если зазоры очень малы, то скорость проникновения в них жидкого металла будет очень мала, и тоже могут получиться непропаи. Таким образом, существуют оптимальные размеры зазоров, обеспечивающие хорошее качество паяных соединений. В производственных условиях особые трудности представляет сборка деталей изделия под пайку по оптимальным зазорам, от которой зависит качество паяного изделия (прочность, электропроводимость, коррозионная стойкость).

При пайке изделий, собранных с некапиллярным или неравномерным зазором для удержания жидкой фазы припоя в зазоре и управления растеканием его по поверхности используют композиционные припои, которые содержат наполнитель для образования в паяльном зазоре системы капилляров. Такие припои получают, например, спеканием порошка или волокон тугоплавкого материала с последующей пропиткой жидкой легкоплавкой фазой (рис.3.76).

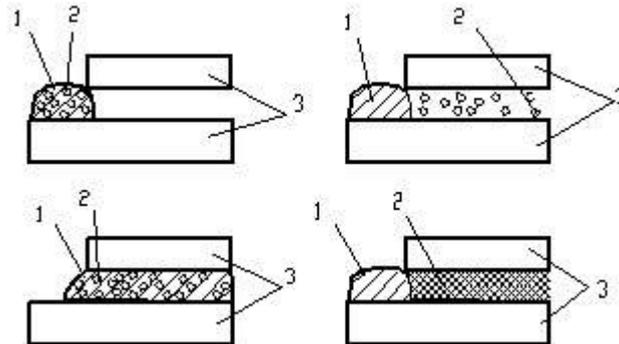


Рис.3.76. Примеры размещения наполнителя (2) и легкоплавкой составляющей (1) композиционного припоя между паяемыми пластинами (3)

Для соединения разнородных металлов, например, титана со сталью, алюминия с медью и др. применяется контактно-реактивная пайка, при которой припой образуется в результате контактно-реактивного плавления. Она основана на способности некоторых металлов образовывать в месте контакта сплавы (эвтектики или твердые растворы), температура плавления которых ниже температуры плавления любого из соединяемых металлов. Когда соединяемые металлы не образуют между собой подобного типа сплавы, или при пайке однородных металлов используют промежуточную прослойку или наносят покрытие на соединяемые поверхности 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. К таким более легкоплавким сплавам относятся эвтектики - твердые растворы с минимумом на диаграмме состояния (см. рис.3.77).

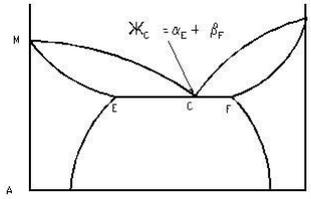
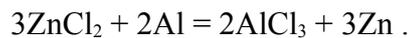


Рис.3.77. Диаграмма состояния сплава с эвтектикой

Процесс контактного плавления начинается с образования физического контакта между соединяемыми поверхностями по активным центрам. В них в твердом состоянии происходит взаимная диффузия металлов и непрерывное изменение их концентрации в точке контакта. При некоторой температуре произойдет расплавление и образуется зона расплава, которая будет увеличиваться и растворять в своем объеме взаимодействующие металлы. Количество таких контактов будет возрастать по мере осуществления процесса пайки.

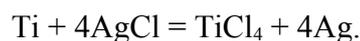
При контактно-реактивной пайке детали необходимо сдавливать. Это создает лучший физический контакт между деталями и способствует выдавливанию избытка жидкой фазы. Вместе с избытками жидкости удаляются частицы оксидов, присутствие которых в паяном шве может снижать их прочность. Следует отметить, что 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.

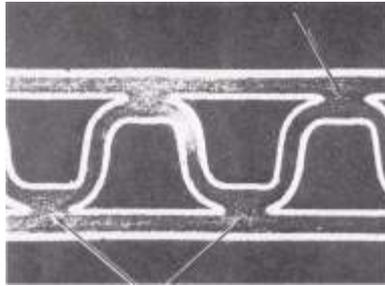
В ряде случаев продукт взаимодействия основного металла с флюсом не является припоем, однако он покрывает поверхность в месте пайки и улучшает смачиваемость дополнительным припоем, который вводится в зазор. Например, с помощью флюса AgCl можно осуществлять реактивно-флюсовое лужение (покрытие) титана серебром:



При температуре 350...400 °С хлорид титана в виде газа улетучивается с поверхности титана, разрушая при этом окисную пленку TiO₂, а восстановленное серебро покрывает чистую поверхность титана, которую затем можно подвергать пайке другими методами.

Паяные соединения имеют очень малый уровень остаточных напряжений, 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).

Пайку в машиностроении и приборостроении применяют очень широко, начиная от пайки узлов реактивных двигателей (рис.3.78) и кончая микромодульными схемами современных элементов электроники (рис.3.79). В последнее время пайку стали использовать и в строительстве соединения оцинкованных труб и листов, мачт электропередач и т. д.



а



б

Рис.3.78. Зона паяного соединения (а) и общий вид блока камер сгорания ЖРД (б)



Рис.3.79.Паяные изделия электронной техники

3.16. Наплавка и напыление

Процессы наплавки занимают важное место в сварочном производстве при ремонте и восстановлении первоначальных размеров изношенных деталей и при изготовлении новых изделий с целью получения поверхностных слоёв, обладающих повышенной твёрдостью, износостойкостью, жаропрочностью, кислотостойкостью и другими специальными свойствами.

Наплавку осуществляют нанесением расплавленного металла на поверхность изделия, нагретую до оплавления или до температуры надёжного смачивания жидким наплавляемым металлом. В результате взаимодействия расплавленного металла с оплавленной (или достаточно подогретой) поверхностью детали между ними образуются металлические связи.

Толщина наплавленного металла может быть 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.3.80, а) или внутренние поверхности изделий - корпуса химических и энергетических реакторов, оборудование химических производств и др. (рис.3.80, б).

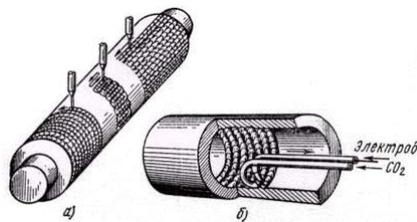


Рис.3.80. Наплавка в защитном газе цилиндрических наружных (а) и внутренних (б) поверхностей

Наплавка позволяет значительно увеличить срок службы деталей и сократить расходы дефицитных материалов на их изготовление. Часто оказывается целесообразным всё изделие изготавливать из более дешёвого и достаточно работоспособного металла для конкретных условий эксплуатации и только на поверхностях, работающих в особых условиях, иметь необходимый по толщине слой другого материала.

В этом случае для изготовления деталей обычно применяют относительно простые и дешёвые материалы (например, низкоуглеродистые стали), а на рабочие поверхности наплавляют, например, бронзу, заменяя тем самым целиком бронзовую деталь.

При восстановлении (ремонте) деталей наплавку выполняют тем же или близким по составу металлом, из которого изготовлено изделие.

Если при наплавке однородных металлов процесс получения качественного соединения между наплавленным и основным металлом не вызывает затруднений, то при наплавке материалов, значительно отличающихся по химическому составу от материала основы, задача получения качественного соединения значительно усложняется и может перерасти в проблему.

При наплавке поверхностных слоёв с заданными свойствами должен выполняться ряд требований.

Таким требованием является, прежде всего, минимальное разбавление наплавленного слоя основным металлом, расплавленным при наложении валиков. Поэтому в процессе наплавки необходимо получение наплавленного слоя с минимальным проплавлением основного металла, так как в противном случае возрастает доля основного металла в формировании наплавленного слоя (рис.3.81) Для уменьшения доли основного металла в наплавленном слое наплавку следует проводить с небольшим шагом.

При наплавке необходимо обеспечить минимальную зону термического влияния и 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 твёрдых и малопластичных интерметаллидов, зон с охрупченными границами зёрен и т. п. При наличии таких прослоек возможны хрупкие разрушения - образование трещин, отслаивание наплавленного металла от основного ещё в процессе изготовления изделия.

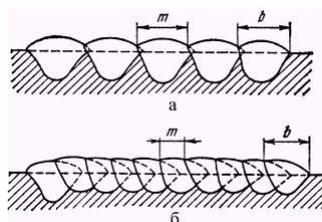


Рис.3.81. Влияние шага наплавки на долю основного металла в поверхностном слое: а - большой шаг; б - малый шаг; m - шаг наплавки; b - ширина валика

В этом случае нужно применять усложнённую технологию: предварительно подбирать и наплавлять подслои (промежуточный слой) из другого металла, который образует твёрдые растворы как с основным, так и с наплавляемыми металлами.

Иногда необходимость подслоя может вызываться и другими причинами. Например, при эксплуатации напавленной детали в условиях частых теплосмен в результате различных значений коэффициентов линейного расширения основного металла и металла напавленного в зоне сплавления могут возникать большие термические напряжения, вызывающие после воздействия определенного числа циклов разрушения в результате термической усталости. В этом случае целесообразно предварительно на основной металл наплавлять подслои с промежуточным значением коэффициента линейного расширения.

В качестве источника тепла можно использовать ацетилено-кислородное пламя (при этом процесс наплавки будет аналогичен процессу сварки, см. рис. 2.12, а); тепло, выделяющееся при прохождении электрического тока по расплавленному шлаку (рис.3.82); но наиболее часто применяют электрическую дугу (рис.3.83).

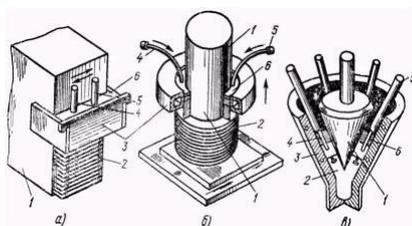


Рис. 3.82. Электрошлаковая наплавка поверхностей: а - плоской; б - цилиндрической; в - конической; 1 - наплавляемая деталь; 2 - напавленный слой; 3 - формирующее устройство; 4 - электроды; 5 - токоподвод; 6 - жидкий шлак

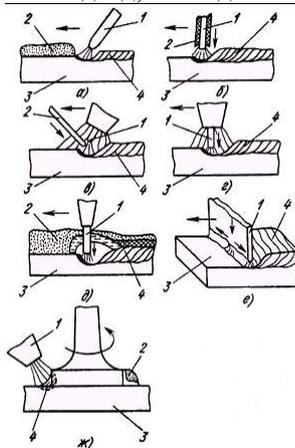


Рис.3.83. Схемы основных способов дуговой наплавки: а - угольным (графитовым) электродом (1) расплавлением сыпучего зернистого наплавочного сплава (2); б - ручной дуговой покрытым электродом (1) с легирующим покрытием (2); в - неплавящимся вольфрамовым электродом (1) в защитных инертных газах с подаваемым в дугу присадочным прутком (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 спечённого из порошков кольца (2) наплавочного материала. 3 - наплавляемое изделие; 4 - напавленный металл.

В качестве материалов для наплавки используют порошки, покрытые электроды, порошковые проволоки, проволоку и ленту сплошного сечения, литые прутки.

Для защиты нагретого и расплавленного металла от взаимодействия с воздухом используют флюсы и защитные газы (активные и инертные).

Качество самого напавленного слоя и зоны его соединения с основным материалов в ряде случаев может быть повышено за счёт термической обработки (предварительной, сопутствующей, последующей). Предварительный или сопутствующий нагрев применяют, например, при наплавке

сталей, склонных к закалке и образованию трещин; это снижает вероятность получения хрупких подкаленных зон в металле детали или в хрупком наплавленном слое. Последующая термообработка обычно применяется для снижения внутренних напряжений и выравнивания микроструктуры.

Когда для металла или зоны соединения нежелательно длительное пребывание при высоких температурах, рекомендуется интенсифицировать охлаждение наплавляемой детали.

Таким образом, при наплавке в каждом конкретном случае необходимо комплексно решать ряд сложных вопросов: выбор материала, обеспечивающего соответствующие условиям эксплуатации 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.

Для защиты поверхностей детали от коррозии, упрочнения поверхности, защиты от абразивного износа, для восстановления изношенных деталей и т. п. в ряде случаев используют напыление (металлизацию). При напылении основной металл не расплавляется и толщина наносимого слоя значительно меньше толщины слоя, получаемого наплавкой: он составляет десятые доли миллиметра, обычно 0,2-0,3 мм.

Процесс напыления протекает следующим образом. В распылительную головку металлизационного аппарата непрерывно подаётся металлическая проволока напыляемого металла или порошок неметаллического материала, которые расплавляются ацетилено-кислородным пламенем или электрической дугой косвенного действия, горящей между двумя проволоками-электродами, или сжатой дугой при плазменном напылении.

Расплавленный металл струёй 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 металлируемой детали (рис.3.84).

Вследствие большой скорости частицы достигают поверхности детали в жидком или пластическом состоянии и внедряются в эту поверхность, прочно сцепляются с ней, образуя металлизационный (напылённый) слой.

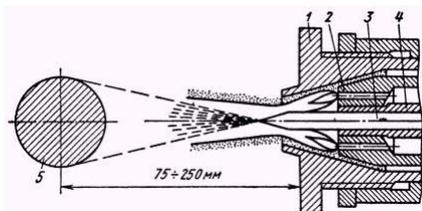


Рис.3.84. Схема работы распылительной головки газометаллизационного аппарата: 1 - сопло наружное для подачи воздуха; 2 - мундштук для подачи газа; 3 - проволока; 4 - сопло для подачи проволоки; 5 - деталь

В настоящее время в технике наиболее широко используется плазменное напыление, преимуществами которого являются: возможность напыления тугоплавких материалов; высокая производительность при напылении керамических материалов; возможность напыления порошковых материалов.

Устройство горелки (плазмотрона) для плазменного напыления показано на рис.3.85.

При плазменном напылении поверхность не следует перегревать свыше температуры 300 °С, так как при этом возникают 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 мундштук горелки (рис.3.85).

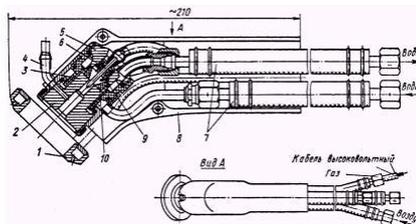


Рис.3.85. Горелка для плазменного напыления: 1 - насадка для охлаждения напыляемой поверхности сжатым воздухом; 2 - сопло-анод; 3 - текстолитовая втулка; 4 - ниппель для ввода газа; 5 - медный корпус катода; 6 - вольфрамовый катод диаметром 3 мм; 7 - водоохлаждаемые кабели; 8 - рукоятка; 9 - свеча зажигания; 10 - асбоцементное кольцо

Плазменное покрытие применяют, как правило, для нанесения жаропрочных покрытий, необходимых в ракетной технике. Для повышения прочности сцепления керамических покрытий с основным металлом их напыляют на подслои. При напылении оксида алюминия в качестве материала-подслоя используют нихром.

Плазменные покрытия используют также в качестве электроизоляционных, например, при изготовлении МГД-генераторов, теплообменников, тензодатчиков, дисков электропил и т. п.

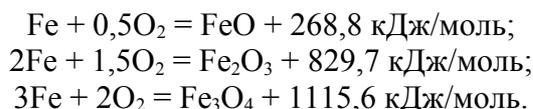
3.17. Резка металлов и неметаллических материалов

В настоящее время, когда изготавливают сотни тысяч тонн сварных конструкций, трудно представить себе сварочное производство без процессов разделительной резки металлов, необходимой для изготовления заготовок конструкций.

В заготовительном производстве широко применяются газовая и электрическая дуговая резка металлов.

Процесс газовой резки металлов основан на сгорании (интенсивном окислении) металлов в струе кислорода и принудительном удалении этой струей образующихся оксидов.

Хорошо известно, что большинство металлов при контакте с кислородосодержащими средами окисляются, и этот процесс идёт с выделением тепла. Так, окисление железа протекает по реакциям:



Интенсивность окисления возрастает с увеличением концентрации кислорода в газе и с повышением температуры. В технически чистом кислороде (чистотой 98-99 %) при некоторой начальной температуре интенсивность окисления становится очень большой и переходит в горение.

Для непрерывности горения необходимы следующие условия:

- контакт окислителя с неокисленным металлом;
- подогрев неокисленного металла до температуры воспламенения;
- высокая концентрация кислорода в газовой фазе, взаимодействующей со сжигаемым металлом;
- температура горения металла должна быть ниже температуры его плавления;
- продукты горения (оксиды) должны находиться в жидком состоянии, т. к. если они будут находиться в твёрдом состоянии, то будут изолировать неокисленный металл от окислительной газовой фазы, а если будут газообразными, то это приведёт к уменьшению концентрации кислорода в газовой фазе.

Процессу резки благоприятствует повышенное количество теплоты, выделяющейся при сгорании металла; резка облегчается при жидкотекучести образующихся оксидов; нормальному процессу резки 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 низкоуглеродистой стали она 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. Нагрев металла обычно осуществляется ацетилено-кислородным пламенем. При прямолинейной резке стали малой толщины (менее 5 мм) применяют резаки с последовательным расположением сопел (рис.3.86, а), а при резке больших толщин используют мундштуки, в которых подогревающее пламя образуется на выходе горючей смеси из мундштука с кольцевым щелевым каналом (рис.3.86, б) или из многосоплового мундштука, имеющего несколько отдельных цилиндрических каналов, также расположенных по концентрической (по отношению к режущему соплу) окружности (рис.3.86, в).

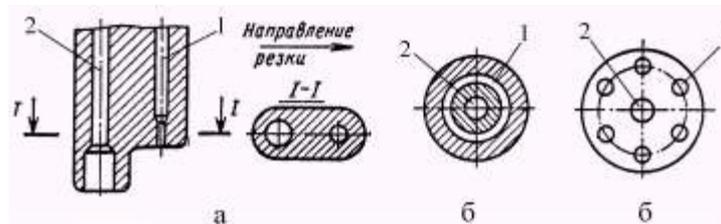


Рис.3.86. Последовательность, форма и расположение подогревающего (1) и режущего (2) сопел

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.3.87).

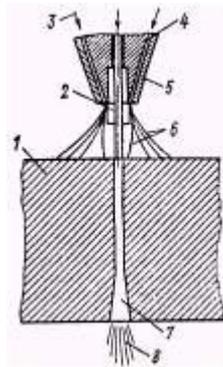


Рис.3.87. Газокислородная резка: 1 - разрезаемый металл; 2 - струя режущего кислорода; 3 - горючая смесь; 4 - режущий мундштук; 5 - мундштук подогревающего пламени; 6 - подогревающее пламя; 7 - рез; 8 - шлаки

При разделительной кислородной резке с механизированным перемещением резака можно достичь точности и чистоту поверхности реза, позволяющие во многих случаях не применять дополнительную механическую обработку (рис.3.88).



Рис.3.88. а - детали магнитной плиты, вырезанные газокислородной резкой по копиру из одного листа в три прохода; б - детали плиты в сборе

В отличие от резки металлов процесс кислородной резки неметаллических материалов (бетона, шлака, огнеупоров) основан на сгорании в режущей струе кислорода металлических порошков, вводимых в зону резки, расплавлении выделенной теплотой неметаллов и последующем удалении расплава струёй кислорода.

Источником тепла 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.3.89). Резку производят при горизонтальном положении листов пилообразным движением электрода, 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. 3.89. 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 струёй сжатого воздуха. Дуга горит между угольным электродом и поверхностью разрезаемого изделия, а сжатый воздух в зону реза подаётся 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 струёй. Качество реза при этом более высокое, чем при воздушно-дуговой резке. Резку можно производить как угольным, так и металлическим электродом. Для подводной кислородно-дуговой резки используют трубчатые металлические электроды. По внутреннему каналу которых подаётся режущий кислород (рис.3.90).

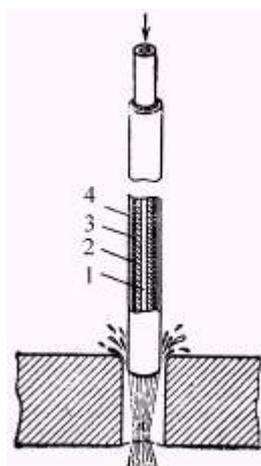


Рис.3.90. Подводная кислородно-дуговая резка: 1 - канал для режущего кислорода; 2 - стальной трубчатый стержень; 3 - электродное покрытие; 4 - гидроизоляция

В последние годы для выполнения качественной резки сплавов алюминия, легированных и даже низкоуглеродистых сталей широко применяется плазменная резка. Сущность её заключается в том, что металл в зоне реза расплавляется и частично испаряется с помощью струи плазмы, получаемой в дуге. Этой же струёй металл удаляется из зоны реза. Температура плазмы достигает 30000°C , а скорость её 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 струёй (рис.3.24, 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.3.24, а и 3.91). Мощными плазменными

горелками, работающими при напряжении до 200 В, можно разрезать плиты толщиной до 150 мм и более.

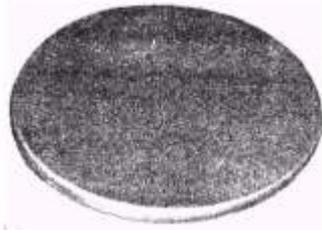


Рис.3.91. Диск из алюминиевого сплава, вырезанный сжатой дугой

4. СВАРКА В XXI ВЕКЕ

Специалисты ведущих стран мира обращают внимание на оценку достижений сварочной науки и техники в прошедшем столетии, а также на выбор приоритетных и перспективных направлений развития сварки и родственных технологий в интересах промышленного производства в начале XXI века. В последние годы этому посвящены международные и национальные конференции, многочисленные публикации ведущих учёных и специалистов в области сварки. Расширяется практика проведения рабочих встреч экспертов по выработке стратегии развития сварочной науки и сварочного производства.

Одним из наиболее ярких и выдающихся учёных в области сварки является академик Борис Евгеньевич Патон, президент Национальной академии наук Украины, директор Института электросварки им. Е.О. Патона. Б.Е. Патон творчески развил идеи и умело продолжил дело, начатое его отцом - видным учёным, основателем Института электросварки. Под руководством Б.Е. Патона коллектив института достиг новых творческих высот и завоевал мировое признание.

Огромный интерес представляет доклад, прочитанный Б.Е. Патоном на Международной конференции "Сварка и родственные технологии - в XXI век", который приводится полностью.

Проблемы сварки на рубеже веков. (Академик Б.Е.Патон, ИЭС им. Е.О.Патона)

На пороге третьего тысячелетия сварка является одним из ведущих технологических процессов создания материальной основы современной цивилизации. Более половины валового национального продукта промышленно развитых стран создается с помощью сварки и родственных технологий. До 2/3 мирового потребления стального проката идет на производство сварных конструкций и сооружений.

Сварке подвергаются практически любые металлы и неметаллы (пластмассы, керамика, стекло и др.) в любых условиях - на Земле, в морских глубинах и в космосе. Толщина свариваемых деталей колеблется от микрометров до метров, масса сварных конструкций - от долей грамма до сотен и тысяч тонн.

Во многих случаях сварка является единственно возможным или наиболее эффективным способом создания неразъемных соединений конструкционных материалов и получения ресурсосберегающих заготовок, максимально приближенных по геометрии к оптимальной форме готовой детали или конструкции.

В различных странах мира в сварочном производстве заняты не менее 5 млн. чел., из них 70...80 % на электродуговых процессах.

Мировой рынок сварочной техники и услуг возрастает пропорционально росту мирового потребления стали и к началу XXI века составит, по оценкам специалистов, не менее 40 млрд. дол.,

из которых около 70 % составят сварочные материалы и около 30 % - сварочное оборудование. Это, естественно, при условии, что разразившийся финансовый кризис не нанесет существенного ущерба темпам развития мировой экономики.

Лидирующее положение на рынке сварочного оборудования занимает оборудование для дуговой сварки, доля которого и дальше будет возрастать в основном за счет оборудования для сварки порошковой и сплошной проволоками при сокращении доли оборудования для ручной дуговой сварки покрытыми электродами.

Контактная сварка прочно удерживает второе место на рынке сварочного оборудования, доля ее применения имеет тенденцию дальнейшего роста.

Объем оборудования для газовой сварки и резки сокращается, тем не менее, все еще остается значительным.

Ощутимые изменения наблюдаются на мировом рынке сварочных материалов. Материалы для механизированных видов сварки в первую очередь порошковая и сплошная проволоки уверенно теснят (по объемам продажи) на рынке покрытые электроды для ручной дуговой сварки.

Еще более очевидно сокращение ручной сварки, если в качестве критерия оценки принимать не объемы продаж, а массу наплавленного при сварке металла. Результаты наблюдений, которые мы у себя в институте ведем на протяжении тридцати с лишним лет показывают, что за этот период в индустриально развитых странах доля металла, наплавленного ручной дуговой сваркой, снизилась практически в 3 раза и составляет сейчас 20...30 %. Учитывая достоинства и недостатки этого способа сварки, есть все основания полагать, что в обозримом будущем доля применения ручной дуговой сварки (по наплавленному металлу) в индустриальных странах стабилизируется на уровне 15...25 %, а в мире в целом будет наблюдаться ее снижение в основном за счет развивающихся стран.

Есть основания предполагать, что и в XXI веке сварка по-прежнему будет интенсивно развиваться. В преддверии следующего века нелишне подумать над возможными путями дальнейшего совершенствования сварки.

Несомненно, что сварка плавлением останется основой сварочного производства. Современные способы сварки плавлением основаны на использовании поверхностных источников нагрева с интенсивностью от 10^4 до $10^8...10^9$ Вт/с m^2 . Казалось бы, что при столь широком диапазоне интенсивности не должны возникать проблемы поиска новых способов нагрева металла. А между тем, они существуют и, надо полагать, в будущем возникнут новые способы нагрева металла при сварке плавлением. Одной из таких проблем является связь между интенсивностью источника нагрева и давлением на жидкий металл. При низкой интенсивности нагрева проплавление основного металла осуществляется путем теплопередачи через жидкий металл. При более высокой интенсивности (например, при дуговой механизированной сварке) со стороны источника нагрева действуют силы электромагнитного происхождения, которые частично вытесняют расплавленный металл из ванны и тем самым способствуют проплавлению основного металла. При дальнейшем увеличении интенсивности нагрева определяющее влияние на вытеснение жидкого металла из ванны приобретает реакция паров. Это явление характерно для лучевых способов сварки, и именно оно предопределяет преимущество лучевых способов сварки как средства, позволяющего при относительно небольшом значении погонной энергии получать глубокое проплавление. Парообразование - это бурно протекающий и трудно управляемый процесс. Стохастичность его протекания приводит к появлению дефектов формирования швов, а иногда и к изменению химического состава металла. Поэтому с помощью средств автоматизированного управления приходится перераспределять мощность источника нагрева по поверхности ванны, т. е. снижать интенсивность нагрева для обеспечения более или менее спокойного протекания процесса.

Поэтому хотелось бы получить новые средства, которые предоставляли бы более широкие возможности для управления проплавлением. В частности, одним из примеров в этой области

является создание Институтом электросварки им. Е. О. Патона способа дуговой сварки по активирующему флюсу. Этот способ сварки за рубежом получил название АТИГ. Активирующая добавка вызывает сжатие дуги, что приводит к усилению электродинамического воздействия на металл, повышению интенсивности его поверхностного нагрева и, как следствие, к резкому возрастанию глубины проплавления.

В перспективе возможно эффективное использование для сварки мощных диодных лазеров, преимуществом которых, по сравнению с газоразрядными и обычными твердотельными, является также несравнимо более высокий КПД.

Безусловно, будет расширяться применение электронно-лучевой сварки благодаря ее уникальной возможности сваривать за один проход металлы толщиной до 200...300 мм. Значительно увеличить габариты свариваемых изделий позволит использование электронно-лучевой сварки в локальном вакууме. На рис. 4.1 показан общий вид созданной в ИЭС установки для электронно-лучевой сварки в локальном вакууме врезных элементов на крупногабаритных обечайках из термоупрочненных алюминиевых сплавов.

Не исключено, что в будущем благодаря успехам в различных областях физики будут созданы новые средства нагрева металла, пригодные для сварки плавлением. В частности, был бы целесообразным поиск средств нагрева, в которых поверхностное выделение энергии сочеталось бы с объемным.

Решающее влияние на развитие дуговой сварки оказало изобретение в начале века покрытого электрода. Благодаря этому открылась перспектива получения сварных соединений действительно высокого качества. Следующим принципиально новым этапом было создание в 1930-х годах технологии сварки под флюсом, позволяющей механизировать процесс сварки и тем самым многократно повысить производительность труда и улучшить качество соединений.

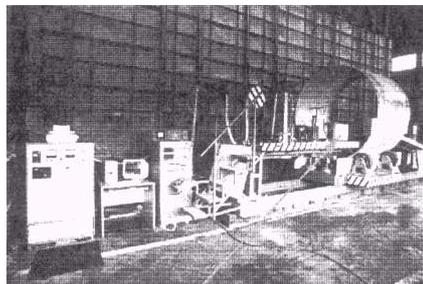


Рис.4.1. Установка для электронно-лучевой сварки в локальном вакууме врезных элементов на крупногабаритных обечайках из термоупрочненных алюминиевых сплавов

В 1940-х годах для защиты металлам неплавящегося электрода стали использовать инертный газ - аргон. В настоящее время это очень распространенный способ сварки.

Следующее десятилетие ознаменовалось тем, что была доказана возможность защиты металла активным газом - углекислым. Появились двойные, тройные и даже четверные смеси активных газов. По распространенности механизированная дуговая сварка в активных газах вышла на второе место после ручной дуговой сварки, а в некоторых странах этот способ опережает последнюю.

Несомненно, и далее будут продолжаться поиски более совершенных способов и средств защиты расплавленного металла от влияния окружающей среды с целью использования их при рафинировании металла шва (в некоторых случаях при легировании его), а также формировании соединения. Все это требует развития теоретических основ нестационарного взаимодействия жидкого металла с окружающей средой. Необходимо развивать наши представления о процессе образования сварного соединения, изучать гидродинамику ванны с учетом множества факторов, в том числе существования поверхностных и объемных сил различного происхождения, зависимости поверхностного натяжения от температуры и др. Новые знания в этой области необходимы для дальнейшего совершенствования процессов сварки плавлением.

Еще в 1950-х годах появилась электрошлаковая сварка. В свое время этот способ сварки имел большое значение для развития тяжелого машиностроения. Заводы получили возможность создавать крупные металлические изделия при ограниченных литейных и кузнечных мощностях. Крупные сосуды, станины больших прессов и многие другие изделия долгое время изготавливали с использованием электрошлаковой сварки. Однако позже, в связи с оснащением заводов тяжелого машиностроения мощными прессами, сталеплавильными печами большой емкости, а также с созданием способов сварки в узкую разделку, интерес к электрошлаковой сварке постепенно уменьшился. Это было вызвано, кроме упомянутых причин, необходимостью высокотемпературной термической обработки изделий после электрошлаковой сварки.

В ходе выполненных в нашем институте исследований последних лет установлено, что скорость электрошлаковой сварки можно существенно увеличить (в 4...5 раз) и тем самым уменьшить перегрев металла; при этом способом электрошлаковой сварки без термической обработки можно получить изделия с необходимым комплексом свойств (рис.4.2). Эффект был достигнут благодаря интенсификации гидродинамических явлений, происходящих в сварочной ванне, путем коммутации токоподводов к электродам и кромкам изделия. Есть все основания предполагать, что в ближайшие годы электрошлаковая сварка в новом варианте займет достойное место в производстве толстостенных изделий.

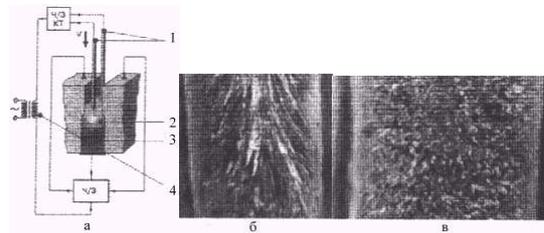


Рис.4.2. Электрошлаковая сварка без последующей высокотемпературной обработки (ЭСШ-БВТО): а - схема процесса ЭШС-БВТО; 1 - электроды; 2 - жидкая металлическая ванна; 3 - сварной шов; 4 - источник сварочного тока; б и в - макроструктура металла шва без коммутации и с коммутацией постоянного тока соответственно

Первые опыты практического применения сварки плавлением были связаны с выполнением ремонтных работ. И сейчас посредством сварки в работоспособное состояние приводят множество самых разнообразных технических сооружений, машин и механизмов. Не утратит своего огромного значения ремонтная сварка и в будущем. Между тем, технология ремонтной сварки развивается слабо. Внимание к ней со стороны специалистов далеко не всегда соответствует ее значению. Нужно совершенствовать технику и средства подготовки изделий к ремонту, создавать специализированное сварочное оборудование, в том числе и механизированное, новые сварочные материалы, обеспечивающие получение соединений высокого качества в сложных условиях ремонта, создавать технологию ремонта без предварительного нагрева изделий и решать множество других технологических задач. Важнейшее значение для выявления в полевых условиях различного рода повреждений, в том числе коррозионного происхождения, имеет совершенствование средств дефектоскопии.

Так, ИЭС совместно с Чернобыльской атомной электростанцией разработана технология локального ремонта корневых трещин в трубопроводах из аустенитной стали 08X18H10T. Причиной появления таких трещин, протяженность которых составляет от 10 до 300 мм, является коррозия под напряжением. Разработанная технология предусматривает сквозную местную выборку дефекта, установку вставки-подкладки, последующую ее заварку и заполнение выборки мелкими продольными валиками аргоно-дуговой сваркой. Технология обеспечивает получение напряжений сжатия в корневой части шва и в 10...20 раз снижает трудоемкость ремонта.

Можно привести немало примеров использования способов сварки плавлением для получения особо износостойких изделий. Это направление в дальнейшем получит должное развитие. Здесь существует очень большое поле для деятельности главным образом в материаловедческом плане, а также в поиске наиболее эффективных технологий получения в наплавленном слое интерметаллидных и других особо твердых включений в прочной и пластичной матрице. Для тонких

наплавки найдут применение микроплазма и лазерное излучение. Дальнейшее совершенствование технологии наплавки в первую очередь необходимо для ремонта множества деталей машин и механизмов, подвергающихся абразивному износу.

Наплавка является одной из важнейших составных частей сварочного производства - из общего объема сварочных материалов для наплавки используется 8...10 % электродов и сплошных проволок, до 30 % порошковых проволок, практически все спеченные и порошковые ленты. В общих объемах наплавочных работ весьма велика доля восстановительной наплавки - 75...80 %. Доминируют в наплавочных работах дуговые способы наплавки. Обобщение публикаций за последние годы позволяет сделать вывод о важности расширения сферы применения изготовительной наплавки. Она позволяет многократно увеличивать срок службы быстроизнашивающихся и тяжело нагруженных деталей, избавляет промышленность от производства большого количества запасных частей, повышает надежность и работоспособность машин и механизмов. Еще одна задача - увеличение уровня механизации наплавочных работ. Механизированные способы наплавки максимум в 2...3 раза повышают производительность труда и обеспечивают более высокое качество по сравнению с ручными способами. В будущем хорошие перспективы имеют способы наплавки, обеспечивающие минимальное проплавление основного металла: электрошлаковая, плазменно-порошковая, лазерная, микроплазменная.

В последнее время успешно прогрессирует технология нанесения покрытий напылением с использованием газового пламени, плазмы, детонации, а также на основе электронно-лучевого испарения и конденсации материалов в вакууме. Напыление удачно дополняет наплавку и конкурирует с ней в отдельных ограниченных областях применения, поэтому необходимо развивать и напыление, и наплавку.

Должна совершенствоваться технология наплавки рабочих поверхностей восстанавливаемых узлов, эксплуатируемых в различных агрессивных средах. Многие изделия, изготавливаемые сейчас из дорогостоящих сплавов на основе железа, никеля, меди, титана, можно было бы получать из более дешевых материалов. Для этого нужны новые экономичные и надежные технологии плакирования.

Во второй половине XX века сформировались представления о физических явлениях, протекающих при сварке плавлением, и о причинах возникновения трещин, пор и других дефектов сварных соединений. Многие явления получили достаточно полное математическое описание. Находят применение различные базы экспериментальных данных и экспертные системы. Тем не менее, мы продолжаем тратить средства, силы и время на изготовление множества образцов и на их испытания. Очевидно, что в ближайшем будущем одной из основных задач в области теории сварочных процессов будет доведение и взаимная увязка математических моделей всего многообразия явлений до той степени совершенства, при которой проведение эксперимента с металлом станет особым исключением.

Последние годы ознаменовались внедрением в дуговую сварку источников питания инверторного типа. В отличие от традиционных они обеспечивают равномерную загрузку фаз электрической сети, имеют коэффициент мощности, близкий к единице. Их масса и габариты значительно уменьшены. Но самое главное преимущество состоит в широчайших возможностях, которые открываются в отношении автоматического управления сварочным процессом. Воздействие на перенос электродного металла, движение металла в сварочной ванне, а следовательно, и кристаллизация шва, его дегазация, формирование внешней поверхности - на все это можно влиять средствами автоматического управления. Чтобы использовать такие возможности, следует углублять наши знания о процессе дуговой сварки как объекте управления. Нельзя также признать недостаточными наши познания и в области лучевых процессов, если рассматривать их с позиций автоматического управления.

Контактная сварка сопротивлением относится к числу наиболее распространенных способов, благодаря развитию автомобилестроения и бытовой техники. В перспективе области применения

этого способа сварки, по-видимому, сохранятся. Возможно, контактную сварку немного потеснит лазерная сварка, особенно там, где используется металл с покрытиями.

Существует две проблемы, связанные с применением контактной сварки сопротивлением. Первая заключается в снижении вероятности появления дефектных соединений. Она будет решаться путем создания более эффективных систем автоматического управления, а в области микросварки - также и за счет применения новых систем питания. Вторая проблема - повышение энергетических показателей мощных машин - будет решаться с помощью разработки более совершенных преобразователей числа фаз, обеспечивающих повышение КПД и коэффициента мощности.

Еще далеко не исчерпаны возможности контактной сварки оплавлением. Несомненно, что дальнейшее совершенствование автоматического управления и систем питания мощных машин позволит успешно решить многие технические проблемы, особенно при производстве изделий с большим поперечным сечением из различных металлических материалов.

Бурное развитие приборостроения и особенно электронной техники привело к созданию ряда способов сварки в твердой фазе: диффузионной, компрессионной и ультразвуковой. Несомненно, появятся и другие способы сварки в твердой фазе, основанные на нагреве и иных способах активации соединяемых поверхностей. Подлежат разрешению сложные проблемы неразрушающего контроля соединений, полученных в твердой фазе, а также диагностики таких соединений непосредственно в процессе сварки по косвенным признакам, фиксируемым автоматически.

Известно, что для сварных конструкций, особенно массового назначения, требуются хорошо свариваемые стали. Напомню, что в конце 1940-х годов только благодаря целеустремленной работе сварщиков под руководством Е. О. Патона при участии металлургов удалось создать хорошо свариваемую сталь для сварных мостов. В частности, мост в Киеве через р. Днепр, построенный из такой стали, надежно эксплуатируется уже почти полвека. Не утратили своего значения комплексные исследования сварщиков и металлургов по созданию экономичных, хорошо свариваемых материалов для массовых сварных конструкций.

При изготовлении конструкций широкого назначения расширяются объемы применения высокопрочных легированных сталей с пределом текучести 550...900 МПа. Разработаны сварочные материалы и основные процессы их дуговой сварки, что позволяет получать свойства сварных соединений, равноценные основному металлу. Прочность таких соединений при статической и малоцикловых нагрузках, а также сопротивляемость хрупкому разрушению значительно выше, чем углеродистых сталей общего назначения. Это позволяет снизить металлоемкость сварных конструкций и обеспечить их высокую работоспособность. По сопротивлению усталости в многоциклового области сварные соединения сталей равнозначны. Несомненно, применение высокопрочных сталей в ответственных сварных конструкциях будет непрерывно расширяться. По нашему мнению, подобные работы необходимо проводить более интенсивно и широко.

Очевидны преимущества легированных высокопрочных сталей с точки зрения снижения металлоемкости сварных конструкций, работающих в условиях статического и малоциклового нагружений. По сопротивлению усталости в многоциклового области сварные соединения сталей достаточно близки.

Остается актуальной проблема сварки различных новых материалов: сплавов на основе железа, никеля, меди, алюминия, титана и многих других очень сложных для сварки материалов, например алюминидов и других интерметаллидов. Обширна и непрерывно увеличивается область применения полупроводниковых материалов, использование которых неразрывно связано с проблемой их соединения с металлическими материалами.

В ИЭС проведен большой цикл исследований, направленных на улучшение свариваемости высокопрочных алюминиевых сплавов, увеличение прочности и других служебных характеристик сварных соединений. Показано, что введение до 0,15 % скандия в основной металл способствует

улучшению свойств деформированных полуфабрикатов, однако сопротивление металла шва образованию горячих трещин и прочность соединений оказываются недостаточными при сварке некоторых сложнелегированных сплавов, например алюминий-литиевых.

Для улучшения свариваемости этих перспективных сплавов предложены комплексные меры, которые предусматривают использование новых сварочных присадок из алюминиевых сплавов, содержащих повышенное (0,5...0,8 %) количество скандия. Такие присадки, даже в случае сварки основного металла без скандия, обеспечивают введение в сварочную ванну достаточного количества этого модификатора, благодаря чему формируется мелкокристаллическая структура швов, уменьшается склонность к образованию кристаллизационных трещин и существенно повышается прочность соединений.

Выполненные исследования позволили установить природу упрочнения литого металла шва при наличии в нем скандия, а также механизм торможения горячих трещин, зарождающихся в процессе кристаллизации швов. Добавки скандия позволяют повысить сопротивление разрушению сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов главным образом за счет образования субдендритной мелкокристаллической структуры и твердого раствора алюминий-скандия, а также за счет выделения из него микродисперсных частиц интерметаллидной фазы при термической обработке. Эффективность скандия проявляется во всех основных системах легирования на основе алюминия *Al-Mg*, *Al-Cu*, *Al-Zn-Mg*, *Al-Mg-Li*, *Al-Cu-Li* и др.

Перспективны многослойные металлические материалы, биметаллические и триметаллические. Многие из них будут рассчитаны на применение в сварных конструкциях. Требуется разработка технологических процессов соединения таких материалов без сколько-нибудь заметной потери их эксплуатационных свойств.

Разнородные материалы, например алюминий-сталь, медь-алюминий, титан-сталь и другие сочетания металлов и сплавов, находят все более широкое применение в машиностроении, атомной энергетике, ракетостроении и других отраслях современной промышленности. Для получения указанных материалов с уникальными физико-механическими свойствами наиболее перспективны следующие методы их соединения без расплавления: диффузионная сварка, сварка взрывом, магнитно-импульсная, сварка трением, пайка, склеивание.

В настоящее время большое развитие получили технологии, основанные на использовании энергии взрывчатых веществ: сварка, резка, штамповка, упрочнение, снятие напряжений в сварных швах, компактирование. К промышленной следует отнести технологию резки взрывом удлиненными кумулятивными зарядами, которая может успешно применяться как на суше, так и под водой для резки трубопроводов и врезке в них отводов, при демонтаже морских стационарных платформ, в авиационной и космической технике, а также в условиях повышенной радиации.

Особое значение приобретают технологии склеивания. В настоящее время создано большое количество различных клеевых композиций, позволяющих соединять металлы, сплавы, пластмассу, резину и другие материалы практически в любых сочетаниях. Накоплен достаточный опыт в проектировании клееных и клеесварных конструкций разработаны технологии и оборудование для подготовки поверхностей и формирования соединений. Дальнейшее направление исследований в области склеивания определяется требованиями повышения прочности, надежности и долговечности клееных соединений при различных условиях эксплуатации.

В последние десятилетия в качестве конструкционного материала все большее внимание привлекают полимеры и композиты на их основе. Выгодно отличаясь рядом свойств, они успешно конкурируют с традиционными материалами (со сталью, цветными металлами), а в некоторых областях являются практически незаменимыми. Эффект от их применения столь высок, что в высокоразвитых странах наблюдалась тенденция существенного сокращения выпуска стали и резкого увеличения производства пластмасс. В связи с ростом объема производства и широким применением пластмасс потребовались значительные усилия специалистов по созданию

современных технологий и оборудования для сварки, особенно для сварки труб из термопластов, используемых при сооружении газо-, водопроводов, коммуникационных систем. Есть несомненные успехи в области ультразвуковой сварки, сварки токами высокой частоты, трением и других способов сварки давлением.

Увеличение номенклатуры материалов, областей их применения, повышение требований к прочности и долговечности соединений требуют существенного углубления знаний в этой сфере и расширения исследований.

Проведенные в последние годы в ИЭС комплексные исследования свариваемости конструкционных полимерных материалов показали, что для них характерны процессы кристаллизации из расплава при охлаждении сварных швов, аналогичные происходящим при сварке металлических материалов.

Активно проводятся исследования по созданию новых композиционных материалов на основе полимерных и металлических матриц с наполнителями, существенно повышающими показатели прочности и жесткости указанных материалов. Так, если у современных алюминиевых сплавов удельная прочность составляет $15...24$ км и удельный модуль упругости находится на уровне $(2,4...2,7)10^3$ км, то значения аналогичных характеристик металлокомпозиата системы А1-В составляют $45...50$ и $(8,3...9,0)10^3$ км, а системы Mg-В - соответственно $45...55$ и $(10...11,5)10^3$ км.

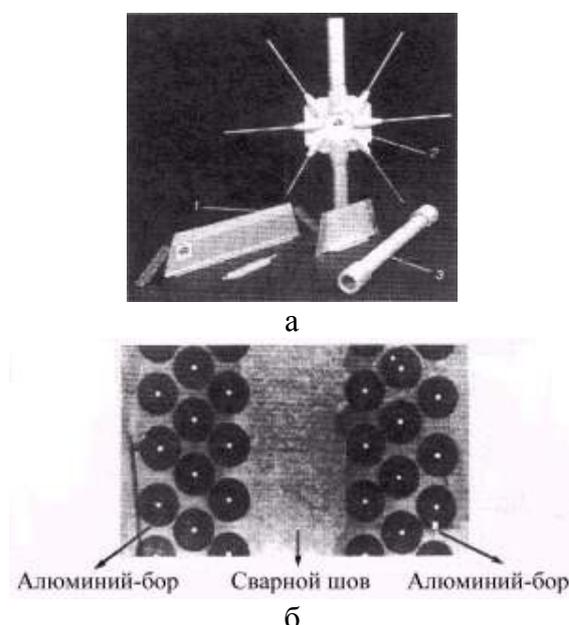


Рис.4.3. Свариваемые композиционные материалы (KM): а - изделия из KM; б - макрошлиф сварного соединения

Особенности различных типов композиционных материалов (волоконистых, дисперсно-упрочненных, слоистых) практически исключают применение традиционных способов сварки. В различных странах уже ведется поиск технологий сварки композиционных материалов. В нашем институте успешно проводятся работы по диффузной сварке трубчатых конструкций из композита системы А1-В и сварке композиционных термопластичных материалов. На рис.4.3 показаны фрагменты сварочных конструкций из композиционных материалов и микроструктура шва композиции алюминий-бор и алюминий-бор, сваренного диффузионной сваркой. По-видимому, в ближайшие десятилетия ученые-сварщики будут продолжать исследования в этой области.

Одна из важнейших проблем будущего века - освоение космического пространства, в решении которой важную роль должна сыграть сварка. Сооружение различных крупногабаритных комплексов на околоземных орбитах, Луне, планетах, а также их ремонт не обойдутся без сварочной техники. Пока наиболее перспективным способом в условиях космического пространства мы считаем электронно-лучевую сварку. Не исключено, что в недалеком будущем будут созданы образцы лазерных устройств, имеющие достаточно высокий КПД и пригодные для этих целей. Эксперименты по электронно-лучевой сварке в открытом космосе, выполненные ИЭС им. Е.О.

Патона совместно с НПО "Энергия" еще в 1984-1986 гг., позволили изучить особенности получения сварных соединений в условиях вакуума и микрогравитации, оценить возможности человека в скафандре выполнять функции сварщика-ручника. Проведены комплексные эксперименты по раскрытию ферменных конструкций, сопровождающиеся сваркой и пайкой их отдельных узлов. Создана и эксплуатируется на орбитальной станции "Мир" система многократного раскрытия и складывания солнечных батарей протяженностью 15 м (см. рис. 4.4).

Конструкция оказалась весьма надежной. Об этом свидетельствует то, что в связи с пристыковкой "Шаттла" к станции "Мир" солнечная батарея была сложена в космосе после более пяти лет ее эксплуатации, перенесена в другое место и повторно раскрыта.

Весьма перспективны для использования в космосе трансформируемые тонкостенные оболочечные конструкции, которые на месте монтажа под действием сжатого воздуха преобразуются в заданные объемы с коэффициентом у трансформации до 50 (рис.4.5). С их помощью могут создаваться переходные отсеки на орбитальной станции, обтекатели, складские помещения и другие конструкции не только для эксплуатации в открытом космосе, но и в земных условиях, например создание емкостей различного назначения. Можно с уверенностью сказать, что новые решения по созданию постоянно действующих орбитальных станций уже в ближайшие годы потребуют применения сварочных технологий в открытом космосе для проведения строительно-монтажных работ.

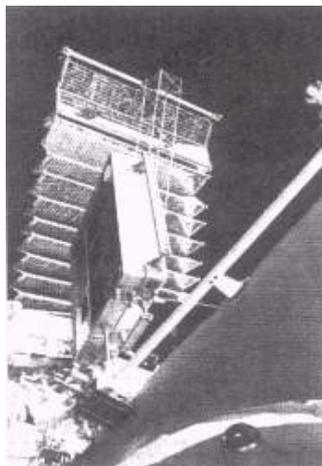


Рис.4.4. Трансформируемые конструкции солнечных батарей на станции "Мир"

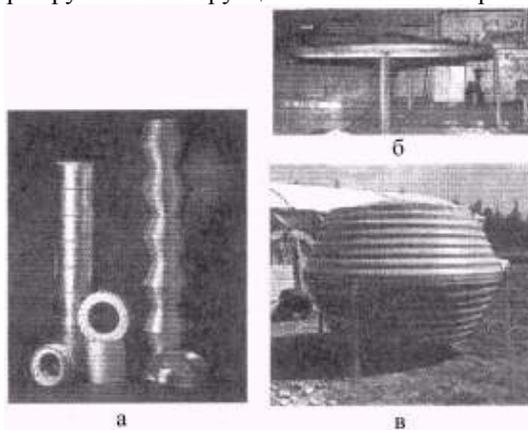


Рис.4.5. Трансформируемые оболочечные конструкции: а - аэрокосмические; б - емкость для хранилища зерна перед раскрытием; в - то же, но в развёрнутом виде

В будущем веке предстоит освоение глубин Мирового океана, для чего потребуются создание новых сварочных технологий. В этой области наши возможности пока ограничены. При современном уровне техники дуговая сварка порошковой проволокой так называемым мокрым способом осуществляется на глубине до 30 м. Существуют серьезные ограничения по номенклатуре металлов, пригодных для сварки таким способом. С увеличением глубины резко изменяются свойства дуги, интенсифицируется взаимодействие расплавленного металла с окружающей его средой и становится

проблематичным получение качественных соединений. Возможно, в перспективе удастся найти пути предотвращения чрезмерного сжатия дуги, а также новые способы защиты наплавленного металла. Однако все это позволит лишь несколько расширить возможности применения мокрого способа, но не решит проблему коренным образом. Кроме того, следует учитывать, что мокрый способ подходит только для глубины, доступной для работы человека в скафандре, т. е., по-видимому, не превышающей 120...160 м. Погружение человека возможно и на большую глубину, но при этом его работоспособность становится весьма ограниченной.

Выполнение сварки в специальных камерах (сухой способ сварки) в присутствии человека имеет также немало ограничений, в том числе и по глубине; к тому же он слишком дорогостоящий. Следует изучить возможности лазерного излучения с целью использования его как для резки, так и для сварки на большой глубине. В будущем создание лазерных установок такого назначения представляется вполне вероятным. Не исключена возможность применения в указанных условиях контактной стыковой сварки. Предварительные эксперименты подтвердили перспективность использования этого способа сварки под водой.

Достаточно сказать, что созданные в нашем институте технология и оборудование впервые в мире успешно прошли опытно-промышленную проверку при сварке реальных конструкций под водой. Схема сварочной установки и комплекс по ремонту морских трубопроводов показаны на рис. 4.6.

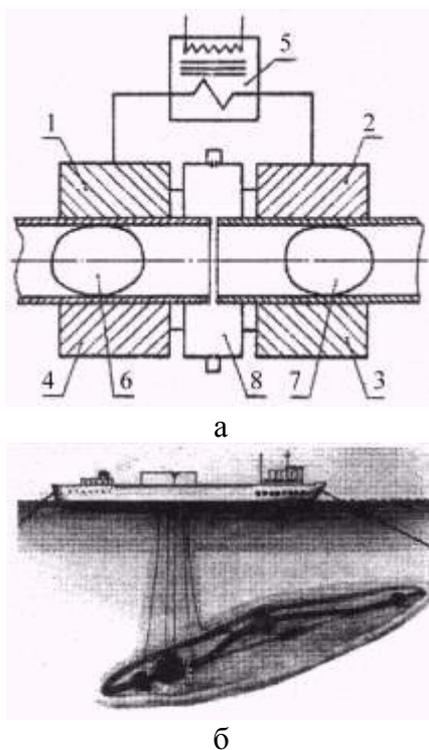


Рис.4.6. Автоматическая стыковая сварка оплавлением труб под водой при строительстве и ремонте морских трубопроводов. а - схема сварочной установки: 1-4 - токоподводящие зажимы; 5 - сварочный трансформатор; 6,7 - изолирующие шары; 8 - локальный изолирующий объем; б - комплекс по ремонту морских трубопроводов

Очевидно, что в ближайшем будущем необходимо будет совершенствовать как мокрый, так и сухой способы сварки, а также разрабатывать новые механизированные способы сварки и оборудование, пригодные для использования на километровой глубине. Это не фантазия, а настоящая потребность, связанная с неизбежностью прокладки в ближайшие годы газо- и нефтепроводов на такой глубине, ремонт их будет связан с использованием резки и сварки.

Существует еще одна проблема, решить которую в свое время пытались сварщики. В 1960-х годах в МВТУ им. Н. Э. Баумана совместно с медицинскими учреждениями были начаты работы по сварке, наплавке и резке живых тканей с использованием для этих целей ультразвука. Однако разработанные в то время способы сварки костных и мягких тканей, показавшие вначале многообещающие результаты, не выдержали проверки временем и не получили широкого

распространения. И только резка с использованием ультразвука продолжает успешно использоваться. Позже, с появлением лазеров, начались исследования по применению их в медицине, прежде всего в хирургии сосудов. По этому вопросу опубликованы десятки работ. Соединение тканей в данном случае происходит за счет так называемой тепловой денатурации белков, сопровождающейся их коагуляцией. Несмотря на множество исследований соединение сосудов лазерным способом до сих пор не получило заметного распространения. По-видимому, основная причина кроется в сложности выполнения соединения и неблагоприятном для данного случая поверхностном выделении энергии. Тот же принцип образования соединения за счет коагуляции белков используется еще с 1920-х годов для остановки кровотечений. При этом нагрев соединяемых стенок сосуда осуществляется токами высокой частоты, протекающими непосредственно через ткань.

Отдельные попытки применения высокочастотной электрической коагуляции белков не для остановки кровотечений, а для соединения сосудов с целью восстановления их работоспособности не дали положительных результатов и лишней раз продемонстрировали всю сложность решения этой задачи. Исследования, проведенные нами в последние годы, показали перспективность использования высокочастотной электрической коагуляции не только для соединения сосудов с целью восстановления их работоспособности, но и для соединения большей части тканей живого организма. Еще предстоит большая работа по доведению этой технологии до той степени совершенства, при которой ее можно было использовать в хирургической практике.

Как известно, конечным продуктом сварочного производства являются сварные конструкции. Создание экономичных, надежных и долговечных сварных конструкций, работающих на земле и под водой, при нормальных, высоких и криогенных температурах, в агрессивных средах и при интенсивном радиационном облучении, в различных экстремальных условиях эксплуатации, является важной научно-технической проблемой. Общие объемы производства сварных конструкций в мире составляют сотни миллионов тонн в год. Сварка предоставляет широкие возможности для оптимизации конструктивных решений, снижения трудоемкости изготовления конструкций, использования рациональных типов конструктивных элементов, позволяющих существенно уменьшить металлоемкость. Вместе с тем для реализации широких возможностей сварки необходимо дальнейшее совершенствование подходов к конструированию узлов и соединений, к учету особенностей их работы при различных условиях нагружения. Создание высокоэффективных сварных конструкций требует решения комплекса задач, включая разработку хорошо свариваемых сталей, методов расчета сварных соединений и узлов, наиболее полно отвечающих их действительной работе, разработки высокопроизводительных сварочных процессов, оборудования и материалов, а также изыскание новых конструктивных форм, отвечающих требованиям высокой технологичности изготовления и заводской готовности конструкций.

Исторически сложилось так, что большое количество эксплуатирующихся в настоящее время ответственных сварных конструкций приближается к своему критическому возрасту. Поэтому весьма актуально развитие научно-технических подходов к оценке и продлению ресурса эксплуатируемых сварных конструкций машин и оборудования. Такие подходы должны базироваться на комплексном анализе всех стадий жизненного цикла конструкций.

Примером комплексного подхода к повышению надежности и долговечности сварных конструкций ответственного назначения является программа "Высоконадежный трубопроводный транспорт". Ее основной целью является обеспечение надежности и безопасной эксплуатации трубопроводного транспорта. Проблемы надежности должны охватывать вопросы проектирования, технологии строительства, эксплуатации и ремонта. На наш взгляд, необходимы аналогичные комплексные программы для других классов сварных конструкций ответственного назначения, особенно для конструкций атомной и тепловой энергетики, а также мостостроения.

Так, все большую актуальность приобретает проблема оценки ресурса сварных корпусов реакторов типа ВВЭР-1000 на атомных электростанциях. По ряду причин конструкторского и технологического характера скорость радиационного охрупчивания сварных соединений корпуса

оказывается выше расчетной, что может привести к уменьшению реального ресурса корпуса реактора по сравнению с проектным. Поэтому необходима организация работ по программе "Определение остаточного ресурса сварных корпусов действующих на атомных электростанциях реакторов типа ВВЭР-1000 и разработка технологии восстановительной обработки для увеличения срока их эксплуатации".

Аналогичные мероприятия, необходимы для обеспечения надежности сварных пролетных строений железнодорожных мостов. На сети железнодорожного транспорта стран СНГ эксплуатируются тысячи сварных пролетных строений. В ряде сплошностенчатых пролетных строений имеются усталостные трещины. Их количество продолжает возрастать. Они развиваются в длину, создавая реальную угрозу безопасности движения поездов. Необходимо провести работу по совершенствованию принципов проектирования и технологии изготовления таких конструкций.

Повышение качества и работоспособности сварных конструкций неразрывно связано с совершенствованием такого важного и трудоемкого процесса, как неразрушающий контроль качества сварных соединений. Должны получить дальнейшее развитие работы по созданию современной аппаратуры для неразрушающего контроля качества как в заводских условиях, так и на монтаже. Особенно актуальна работа по созданию портативной аппаратуры для ультразвукового контроля, которая позволила бы с большой достоверностью определять и описывать дефекты в трехкоординатных плоскостях в автоматическом режиме.

Для контроля состояния сварных конструкций в процессе их эксплуатации необходимо дальнейшее развитие средств технической диагностики, из которых, по нашему мнению, большие перспективы имеет акустическая эмиссия. Акустоэмиссионный контроль сосудов различного назначения (см. рис. 4.7) показал эффективность и достоверность этого метода. Сопоставление сигналов с реальными дефектами в конструкциях подтверждает большую достоверность полученной информации.

Так как большая часть сварных конструкций работает в условиях повторно-переменных нагрузений, на наш взгляд, следует значительное внимание уделять разработке методов повышения сопротивления усталости сварных соединений.

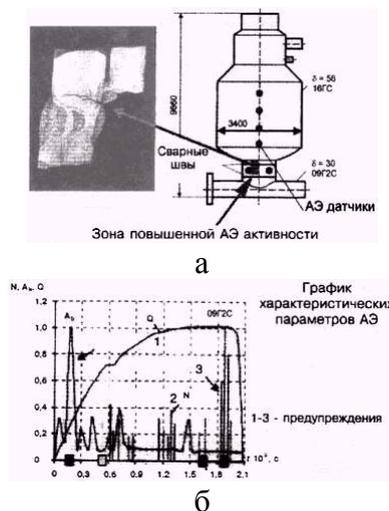


Рис.4.7. Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций на основе метода акустической эмиссии (АЭ)

Эффективно применение упрочняющих технологических обработок швов после их сварки. В ИЭС им. Е. О. Патона особое внимание уделяется ударной ультразвуковой обработке сварных швов, поскольку она весьма технологична и дает возможность обеспечивать прочность соединений на уровне прочности основного металла, а долговечность сварных соединений увеличивать на порядок. Существенное влияние на несущую способность сварных конструкций и их ресурс при эксплуатации в агрессивных средах оказывают остаточные напряжения, создаваемые термическим циклом сварки плавлением. В ИЭС создан метод и ультразвуковой прибор для определения остаточных напряжений. Он применялся для неразрушающего измерения остаточных напряжений в

сварных соединениях лабораторных образцов, конструкциях, а также в сооружениях при их монтаже и эксплуатации; эффективен для оценки качества послесварочной обработки сварных соединений, имеющей целью снижение или перераспределение остаточных напряжений. Необходимо совершенствование расчетных и экспериментальных методов их определения, а также разработка эффективных технологических средств устранения сварочных напряжений и деформаций.

Сварщиками не покорена еще одна из инженерных вершин - гражданское самолетостроение. Считается, что клепка надежнее сварки. При традиционном использовании фюзеляжа и плоскостей самолета, по-видимому, это действительно так. Чтобы с должным эффектом использовать сварку в гражданском самолетостроении, необходимо в первую очередь переработать конструкции самолета с учетом особенностей механизированных и автоматизированных способов сварки. Потребуется выбрать, а вероятнее всего, создать новые хорошо свариваемые легкие сплавы. Только при этих условиях можно будет рассчитывать на уменьшение массы самолета при сохранении его высокой надежности и ресурса эксплуатации. Представляется, что в ближайшие годы будет решена проблема изготовления фюзеляжа аэробуса в виде сварной стрингерной оболочечной конструкции.

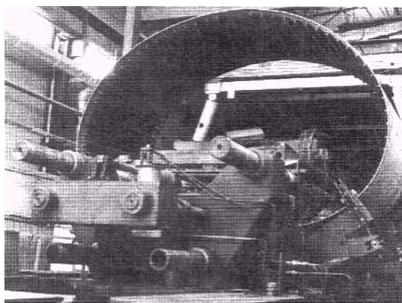


Рис.4.8. Сварная стрингерная оболочка в процессе изготовления. Диаметр оболочки 4000 мм, длина оболочки 2000 мм, толщина обшивки 5 мм, 72 ребра жёсткости приварены к обшивке с применением ЭЛС

Опыт создания крупногабаритных структурных сварных оболочек диаметром 4000 мм с применением электронно-лучевой сварки уже имеется. На рис.4.8 показана такая оболочка диаметром 4000 мм из сплава АМг6Н в процессе сварки.

Мы далеки от мысли о том, что приведенный выше краткий обзор проблем исчерпывает картину будущего развития сварки. К тому же время внесет свои коррективы. Несомненно только то, что сварка и далее будет интенсивно развиваться, поскольку является ключевой технологией для многих отраслей производства, строительства, транспорта, электронной техники и связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном учебном пособии приведена краткая история зарождения и развития сварки; рассмотрены в порядке первого знакомства со специальностью основные виды сварки и процессы, протекающие при сварке; даны примеры применения сварки при решении конкретных задач.

Следует отметить, что сварочная техника не так проста, как о ней может сложиться впечатление при прочтении учебного пособия. Это очень большой комплекс человеческих знаний, воплощённый в современную сварочную науку и технику. Инженер-сварщик должен быть достаточно подготовленным человеком и обладать поистине энциклопедическими знаниями. В современной науке и технике не так много найдётся ещё специальностей, которые требовали бы столь обширных и разносторонних знаний. Посудите сами. Например, решая проблему электродуговой сварки, инженер выбирает способ сварки, оборудование, источник питания, способы управления процессом сварки, сварочные материалы, оптимизирует технологию, выбирает методы контроля качества соединения и проектирует технологическую оснастку. Значит, он должен хорошо знать электротехнику, электронику, теорию сварочных процессов, металловедение, уметь конструировать и проектировать.

Каким бы видом сварки, пайки или резки не занимался инженер, ему не обойтись без серьёзной подготовки в области производства металлов и сплавов. Он должен хорошо знать свойства сплавов и их поведение при нагреве и охлаждении, при различных видах нагрузки. При работе в агрессивных средах и т. д.

Конечной целью деятельности инженера является сварная конструкция (подводный ракетноноситель или космический корабль, ажурная телебашня или магистральный трубопровод...). Поэтому специалист должен уметь рассчитать её. Здесь ему не обойтись без знаний по высшей математике, сопротивлению материалов, теории тепловых расчётов и др.

Процессы, протекающие при сварке сложны и многообразны. Чтобы разобраться в них, необходимо привлечение теории моделирования и использование современной компьютерной техники.

Авторы надеются, что материал, приведенный в учебном пособии, позволит студентам-первокурсникам специальности "Сварочное производство" в достаточной степени ознакомиться с историей развития, современными процессами сварки и перспективными направлениями её развития в XXI веке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демянцевич В.П. Технология и оборудование сварки плавлением. М.: Машиностроение, 1977. 432 с.
2. Корниенко А.Н. У истоков "электрогефеста". М.: Машиностроение, 1987. 168 с.
3. Николаев Г.А., Ольшанский Н.А. Специальные методы сварки. М.: Машиностроение, 1975. 231 с.
4. Патон Б.Е., Корниенко А.Н. Огонь сшивает металл. М.: Педагогика, 1988, 144 с.
5. Сварка в машиностроении. Справочник в 4-х т. / Редкол. Г.А.Николаев (пред.) и др. М.: Машиностроение, 1978. Т.2. / Под ред. А.И. Акулова, 1978. 462 с.
6. Специальные методы сварки и пайка / В.А.Саликов, М.Н.Шушпанов, В.В.Пешков, А.Б.Коломенский. Воронеж: ВГТУ. 2000. 214 с.
7. Теория сварочных процессов / Под ред. В.В.Фролова. М.: Высшая школа, 1988. 559 с.
8. Технология и оборудование сварки плавлением / Под ред. Г.Д.Никифорова. М.: Машиностроение, 1986. 320 с.
9. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б.Е. Патона. М.: Машиностроение, 1974. 768 с.
10. Фетисов Г.П. Сварка и пайка в авиационной промышленности. М.: Машиностроение, 1983. 216 с.
11. Фролов В.В., Парахин В.А. Молодёжи о сварке. М.: Машиностроение, 1979. 111 с.
12. Шебеко Л.П. Оборудование и технология дуговой автоматической сварки. М.: Высшая школа, 1986. 279 с.
13. Андреев В.В. Инверторные источники питания сварочной дуги // Сварщик, 1999. №6. С. 25-29.
14. Блащук В.Е. Металл и сварка в монументальной скульптуре // Автоматическая сварка, 2002. №5. С. 46-52.
15. Корниенко А.Н. Сварочная техника в годы второй мировой войны // Автоматическая сварка, 1997. №7. С. 42-51.
16. Корниенко А.Н. Первые изобретения в области контактной сварки // Автоматическая сварка, 1996. №5. С. 45-52.
17. Патон Б.Е. Проблемы сварки на рубеже веков // Автоматическая сварка, 1999. №1. С. 4-14.