

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технологии металлов»

# СВАРКА И НАПЛАВКА

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов специальности  
1-36 01 04 «Оборудование и технологии высокоэффективных  
процессов обработки материалов»  
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2020

УДК 621.7  
ББК 32.9  
С24

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технологии металлов» «01» сентября 2020 г.,  
протокол № 1

Составитель канд. техн. наук, доц. А. С. Федосенко

Рецензент А. П. Прудников

В методических рекомендациях изложены сущность процесса сварки, особенности основных способов сварки плавлением и наплавки. Представлена методика проведения лабораторных работ для студентов специальности 1-36 01 04 «Оборудование и технологии высокоэффективных процессов обработки материалов» очной и заочной форм обучения.

Учебно-методическое издание

## СВАРКА И НАПЛАВКА

Ответственный за выпуск	Д. И. Якубович
Корректор	Е. А. Галковская
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 66 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2020

## Содержание

1 Лабораторная работа № 1. Сварка плавлением.....	4
2 Лабораторная работа № 2. Сварка давлением.....	10
3 Лабораторная работа № 3. Ручная дуговая сварка и наплавка.....	14
4 Лабораторная работа № 4. Сварка и наплавка в среде углекислого газа.....	20
5 Лабораторная работа № 5. Плазменная наплавка.....	23
6 Лабораторная работа № 6. Сварка пластмасс.....	26
7 Лабораторная работа № 7. Газопламенная наплавка оплавлением...	32
8 Лабораторная работа № 8. Лазерная наплавка.....	35
Список литературы.....	40

# 1 Лабораторная работа № 1. Сварка плавлением

**Цель работы:** ознакомиться с теоретическими и технологическими основами способов сварки плавлением. Изучить сварные швы, выполненные основными способами сварки плавлением.

**Оборудование и материалы:** образцы сварных швов, выполненных дуговыми способами сварки.

## **Порядок выполнения работы**

1 На образцах изучить сварные швы, полученные ручной дуговой сваркой, сваркой в среде защитных газов и сваркой под флюсом.

2 Составить отчет.

### **1.1 Физическая сущность процесса сварки**

При сварке плавлением под действием источника тепла кромки металла свариваемых элементов (основной металл) и, если необходимо, дополнительный металл (сварочная проволока и др.) расплавляются в месте соединения, совместно образуя сварочную ванну, в которой происходят различные физико-химические взаимодействия. При охлаждении, по мере удаления источника тепла, металл сварочной ванны кристаллизуется, образуя сварной шов, соединяющий свариваемые элементы.

Задачей сварочной операции является получение механически неразъемных соединений, подобных по свойствам свариваемому материалу. Это может быть достигнуто в том случае, если по своей природе сварное соединение будет максимально приближаться к свариваемому металлу.

Для получения сварного соединения необходимо пограничные слои одной свариваемой детали приблизить к пограничным слоям второй на такое расстояние, при котором между ними возникнет единое энергетическое поле. При сварке плавлением это достигается расплавлением кромок свариваемых деталей. При этом свариваемые детали необходимо сблизить на расстояние  $A \approx 4 \cdot 10^{-10}$  м, при котором между ними произойдет преодоление энергетического барьера потенциальной энергии системы атомов поверхностных слоев и образуются общие межатомные, межионные и металлические связи. Сближению деталей до нужного расстояния препятствуют неровности поверхности, а также находящиеся на ней загрязнения и оксидные пленки. Для преодоления их влияния необходимо затратить энергию, которая при сварке передается свариваемым поверхностям двумя физическими процессами: нагревом и давлением.

Таким образом, все способы сварки делятся на две большие группы: сварка давлением и сварка плавлением. Для первой группы характерно наличие усилия сжатия свариваемых деталей, которое обеспечивает пластическое деформиро-

вание металла в зоне сварки. Для второй группы сварка производится без давления, а нагрев металла производится выше температуры его плавления.

В зависимости от источника нагрева металла сварка плавлением делится на следующие виды [1–3]:

1) дуговая; источник нагрева металла – дуговой разряд. Источник энергии – постоянный или переменный ток. Под воздействием тепла торец электрода и кромки соединяемых деталей расплавляются, образуется сварочная ванна, представляющая собой небольшой объем расплавленного металла, который после затвердевания образует сварной шов;

2) плазменная; источник нагрева металла – сжатая электрическая дуга, через которую со сверхзвуковой скоростью продувается газ, приобретающий свойства плазмы. Энергоносителем служит электрический разряд. Источник нагрева – плазма. Принцип действия плазменной сварки основан на плавлении металла потоком высокоионизированного газа, генерируемого сжатой дугой, расположенной в плазмотроне. Плазмообразующий газ, проходя через плазму, превращается в поток заряженных частиц, который выдувается из сопла плазмотрона;

3) электрошлаковая; источник нагрева металла – расплавленный флюс (шлак), по которому протекает электрический ток. Процесс заключается в прохождении электрического тока через присадочный материал, подаваемый в сварочную ванну, расплавленный шлак, к основному металлу. Этим обеспечивается расплавление основного и присадочного металла, а также флюса, постоянно поступающего в ванну;

4) электронно-лучевая; источник нагрева металла – кинетическая энергия электронов, движущихся в вакууме под действием мощного электрического поля. Плавление металла происходит под действием энергии, полученной в результате интенсивной бомбардировки быстро передвигающимися в вакууме электронами места сварки. Кинетическая энергия электронов после удара о поверхность свариваемых деталей превращается в тепловую;

5) лазерная; источник нагрева металла – луч оптического квантового генератора (лазера) в световом или инфракрасном диапазоне. Процесс состоит в расплавлении кромок металла лазерным лучом. Его образование происходит с помощью специального источника света, получаемого в следствии излучения фотонов возбужденными атомами. Поток лазерного излучения направляется в фокусирующую систему, превращается в пучок, меньшего размера и отправляется на свариваемые детали. Луч проникает в материал, поглощается, нагревает его и расплавляет, в результате чего формируется сварной шов;

6) газовая; источник нагрева металла – высокотемпературное пламя, образующееся при сгорании газа в смеси с кислородом.

Первые пять способов иногда называют способами электрической сварки плавлением. Последний относят к газопламенной обработке металлов, т. к. электрическая энергия для его осуществления не используется. Наиболее распространенной среди способов сварки плавлением является дуговая.

Для получения качественного сварного соединения расплавленный металл

в процессе сварки необходимо защищать от окружающей среды. В зависимости от применяемой защиты различают следующие способы сварки:

- покрытыми электродами. Роль защиты выполняет покрытие электрода, разлагающееся при нагреве;
- под флюсом. Защита осуществляется с помощью специального порошка (флюса), который подается в зону сварки из бункера;
- в защитных газах. Защита осуществляется с помощью газа, который, как правило, подается через сопло сварочной горелки;
- порошковой проволокой. Функцию защиты выполняет предварительно засыпанный в трубчатую сварочную проволоку порошок, который при нагреве разлагается с образованием газа и шлака;
- в вакууме. Расплавленный металл изолирован от окружающей среды вакуумом, который создается в камере, где осуществляется сварка.

## ***1.2 Формирование структуры металла в зоне термического влияния сварных соединений***

Рядом со швом в основном металле под действием тепла, распространяющегося из зоны сварки, происходят структурные изменения (образуется зона термического влияния). Таким образом, сварное соединение, т. е. металл шва и зоны термического влияния, характеризуется разнообразием структур, а значит, и свойств.

Зона термического влияния (ЗТВ) является неотъемлемой составляющей сварного шва при всех способах сварки плавлением и давлением, связанных с нагревом металла до температуры плавления или близкой к ней. Эта зона охватывает основной металл, не расплавляющийся в процессе сварки и сохраняющий неизменным свой химический состав, но изменивший свою структуру и механические свойства вследствие нагрева и охлаждения в процессе сварки.

Прочность сварного соединения и его эксплуатационные свойства во многом зависят от структурных изменений, которые происходят в ЗТВ. Строение и размеры ЗТВ зависят от химического состава и теплофизических свойств свариваемого металла, мощности источника теплоты, степени его концентрированности, скорости движения и других факторов. Ширина ЗТВ меняется от 1...3 мм при ручной дуговой сварке до 20 мм и более при электрошлаковой сварке.

Термический цикл любой точки металла сварного соединения характеризуется максимальной температурой нагрева, длительностью нагрева до определенной температуры и скоростью охлаждения. Для ЗТВ характерно неравномерное распределение максимальных температур нагрева.

Результат теплового воздействия на металл в ЗТВ зависит от его отношения к термообработке. В зависимости от способа и погонной энергии сварки возможны два предельных случая:

- 1) закалка – при быстром охлаждении – с образованием твердых и хрупких структур и возникающих при этом значительных по величине напряжений;

2) перегрев – при медленном охлаждении, – характеризующийся чрезмерным ростом зерна и снижением пластических и вязких свойств металла.

Оценить общий характер возможных превращений, протекающих в ЗТВ при сварке низкоуглеродистых сталей, можно по диаграмме железо–цементит, а при различных скоростях охлаждения – по термокинетическим диаграммам распада аустенита, которые построены для большинства марок углеродистых и легированных сталей. Скорость охлаждения обычно оценивается в интервале температур наименьшей устойчивости аустенита (500...550 °С). При малых скоростях охлаждения, соответствующих электрошлаковой и ванной сварке, превращение аустенита приводит к формированию структуры, состоящей из феррита и перлита. При средних скоростях охлаждения (автоматическая сварка под флюсом) в зависимости от марки стали образуются перлит и бейнит или бейнит и мартенсит с небольшим количеством феррита. При скорости охлаждения выше критической образуется только мартенсит. Мартенситное превращение сопровождается увеличением объема стали и возникновением больших напряжений, которые могут вызвать разрушение металла. В подобных случаях необходимо принимать специальные меры к улучшению структуры металла ЗТВ и предотвращению образования мартенсита. Эти меры сводятся к изменению теплового режима в процессе сварки, выбору рациональной формы разделки кромок под сварку и последующей термообработке.

На рисунке 1.1 показана схема структур, образующихся в зоне термического влияния при сварке стыкового соединения из малоуглеродистой стали за один проход.



Рисунок 1.1 – Строение ЗТВ при сварке низкоуглеродистой стали

Над сечением шва показана кривая температур, а рядом – часть диаграммы железо–цементит в том же масштабе. В зависимости от температуры нагрева в ЗТВ.

**Участок перегрева.** Он включает металл, нагретый до температур выше 1100 °С, т. е. несколько ниже температуры плавления. Металл на этом участке в процессе нагрева претерпевает аллотропические превращения ( $\alpha$ -железа в  $\gamma$ -железо), сопровождающиеся ростом аустенитного зерна. В тех случаях, когда перегрев сочетается с последующим быстрым охлаждением (за-

калка), металл на этом участке после сварки обладает пониженной пластичностью и прочностью по сравнению с основным металлом. Участок особенно опасен для закаливающихся сталей.

**Участок нормализации (перекристаллизации).** Этот участок охватывает металл, нагретый до температуры, немного превышающей температуру аллотропических превращений (900...1050 °С). Происходящий здесь процесс перекристаллизации при нагреве и охлаждении приводит к значительному измельчению зерен металла. Структура металла становится более мелкозернистой по сравнению с исходной. Механические свойства металла этого участка обычно лучше, чем основного металла.

**Участок неполной перекристаллизации.** Он включает металл, нагретый до температур 700...850 °С. При этих температурах происходит частичная перекристаллизация, т. е. часть феррита остается в исходном состоянии, другая – образует аустенит. При последующем охлаждении и распаде аустенита образуется мелкозернистая структура, поэтому здесь, наряду с зернами основного металла, не изменившимися в процессе сварки, присутствуют зерна, образовавшиеся при перекристаллизации.

**Участок рекристаллизации (старения).** Он наблюдается при сварке сталей, предварительно подвергшихся пластической деформации (ковке, прокатке). Температурный интервал участка 450...650 °С. На этом участке ЗТВ происходят сращивание (укрупнение) раздробленных при нагартовке зерен основного металла и некоторое его разупрочнение по сравнению с исходным состоянием. При сварке изделий из литого материала рекристаллизации не наблюдается. Для металлов и сплавов, склонных к старению, необходимо учитывать некоторое снижение пластичности на этом участке.

Об изменении прочностных и в определенной степени пластических свойств в различных участках металла шва и ЗТВ можно судить по изменению твердости.

Повышение твердости обычно связано с повышением прочности и снижением пластичности. Характер распределения твердости в ЗТВ может быть различным, он определяется химическим составом стали и режимом сварки. Обычно в сварных изделиях не допускается твердость в зоне сварки более  $HV = 300$  МПа.

Таким образом, зона термического влияния неоднородна по структуре и механическим свойствам. Наиболее ослабленным является участок перегрева, а наилучшие механические свойства имеет участок нормализации. В целом механические свойства ЗТВ хуже, чем у основного металла, поэтому ее размеры необходимо ограничивать.

Чувствительность стали к изменению термического цикла сварки зависит от содержания в ней углерода, а также элементов, повышающих ее прокаливаемость и склонность к перегреву.

В сварных соединениях низкоуглеродистой и большинства низколегированных сталей рост зерна в околошовной зоне не оказывает заметного влияния на свойства металла.

При сварке углеродистых и особенно легированных сталей быстрое охлаждение околошовной зоны вызывает часто закалку металла и образование структур, имеющих значительные твердость и хрупкость. В этих случаях для улучшения структуры и свойств ЗТВ применяют термическую обработку, обычно высокий отпуск.

### ***Порядок выполнения работы***

1 Поперечные шлифы сварных швов подвергнуть травлению 10...25-процентным водным раствором азотной кислоты для выявления макроструктуры, которую исследуют невооруженным глазом или при небольшом увеличении (до 5 раз).

2 По макроструктуре определить форму и размеры шва, глубину проплавления, форму и размеры зерен, ширину ЗТВ, размеры крупных зерен в околошовной зоне.

3 Выявить дефекты сварных соединений: непровары, трещины, шлаковые включения и др. Результаты представить в виде зарисовок макроструктуры с изображением выявленных дефектов.

4 Произвести переполировку и повторное травление шлифов 2...4-процентным раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Исследовать микроструктуру швов на оптическом микроскопе. После травления изучить структуру шва и ЗТВ: определить структурные составляющие (феррит, перлит, сорбит и др.) и их относительное количество. Результаты исследований представить в виде зарисовок микроструктуры.

5 Сделать общий вывод о качестве сварного соединения.

6 Оформить отчет.

### ***Содержание отчета***

1 Титульный лист.

2 Цель работы.

3 Описать структуру зоны термического влияния.

4 По результатам исследований образцов зарисовать ЗТВ и описать их основные параметры.

5 Оценить результаты.

### ***Контрольные вопросы***

1 Какие условия необходимо выполнить для получения сварного соединения?

2 Для чего выполняют защиту сварочной ванны от окружающей среды?

3 Каким способом сваривают активные и тугоплавкие металлы?

4 Что влияет на размер зоны термического влияния?

5 Как влияет ЗТВ на свойства сварного соединения?

6 От чего зависит размер ЗТВ?

## 2 Лабораторная работа № 2. Сварка давлением

**Цель работы:** изучить сварные швы, выполненные основными способами сварки давлением. Определить влияние режимов контактной точечной сварки на глубину проплавления металла.

**Оборудование и материалы:** образцы сварных швов, выполненных способами сварки давлением.

### Порядок выполнения работы

- 1 На образцах изучить сварные швы, полученные стыковой сваркой, точечной сваркой, а также роликовой сваркой и сваркой трением.
- 2 Экспериментально установить влияние продолжительности включения тока и его величины на глубину проплавления образцов.
- 3 Составить отчет.

### 2.1 Общие сведения

К основным способам *электроконтактной* сварки давлением относят: стыковую, точечную и роликовую. Также к сварке давлением относят такие способы, как сварку трением, ультразвуковую сварку, диффузионную сварку, сварку взрывом.

*Электроконтактная* сварка – это процесс образования неразъемного соединения металлов путем их нагрева, проходящим электрическим током и пластической деформации зоны соединения за счет усилия сжатия.

Сила сварочного тока при контактной сварке достигает десятков и даже сотен тысяч ампер. Такие токи получают в понижающих однофазных сварочных трансформаторах, имеющих во вторичной обмотке чаще всего один виток.

Сопротивление места сварки зависит от чистоты и состояния поверхности свариваемого материала, сопротивления самого материала, величины давления, прикладываемого к свариваемым изделиям, и от других факторов. Наибольшее сопротивление имеет место контакта свариваемых изделий, где и выделяется наибольшее количество тепла. Время сварки в зависимости от толщины и рода свариваемого материала изменяется от сотых и даже тысячных долей секунды до нескольких минут. Когда детали нагреваются до пластического состояния или до оплавления, к ним прикладывается усилие осадки и детали свариваются.

Стыковая сварка. При стыковой сварке свариваемые детали закрепляют в медных зажимах машины (рисунок 2.1). Зажим  $2n$  установлен на подвижной плите, а зажим  $2$  на неподвижной. Для регулирования мощности и изменения силы сварочного тока в трансформаторе  $3$  есть переключатель ступеней  $4$ . Перемещение подвижной плиты и сжатие свариваемых изделий силой  $P$  осуществляется механизмом сжатия. **Основные виды стыковой сварки** – сварка методом сопротивления и оплавления. В первом случае детали сводят в сопри-

косновение и пропускают сварочный ток, а во втором свариваемые изделия несколько раз сводят в соприкосновения и разводят, что сопровождается оплавлением торцов и разбрызгиванием металла. Сварку сопротивлением применяют для соединения изделий сечением до  $300 \text{ мм}^2$ , сварку оплавлением – при большем сечении.

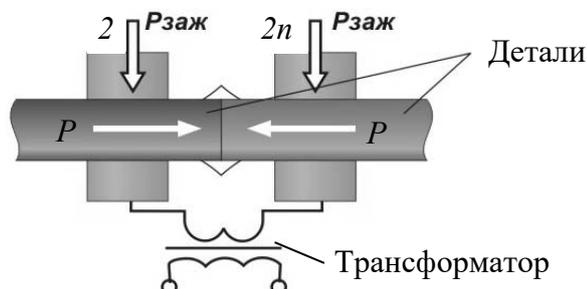


Рисунок 2.1 – Схема стыковой сварки давлением

Сварку непрерывным оплавлением выполняют на машинах с непрерывной подачей деталей только в сторону их сближения. Соприкосновение происходит по выступающим микронеровностям, где возникают большие плотности тока, и металл в этих местах быстро нагревается до расплавленного состояния. Когда вся поверхность свариваемых торцов оплавится, к изделиям прикладывают усилия осадки и выключают ток. Детали соединяются в одно целое.

Сваркой оплавлением соединяют рельсы, магистральные газо- и нефтепроводы, части режущего инструмента и пр.

**Контактную точечную сварку** применяют для соединения листовых конструкций, в которых необходимо обеспечить нужную прочность, а обеспечение герметичности не является обязательным. Суммарная толщина листов обычно не превышает  $10...12 \text{ мм}$ .

При точечной сварке (рисунок 2.2) сложенные внахлестку детали зажимают с некоторым усилием между медными электродами, к которым через электрододержатели подводится ток от сварочного трансформатора. Нижний электрод устанавливают неподвижно, а верхний вместе с электрододержателем перемещается с помощью механизма сжатия, который создает между электродами необходимое давление  $P$ . Зажав изделие, включают трансформатор, и место контакта между изделиями нагревается до образования ядра из расплавленного металла. Последующим приложением усилия осадки осуществляется сварка металлов, которая заканчивается снятием давления и выключением тока. На точечных машинах сваривают углеродистые, легированные, высоколегированные стали и цветные металлы.

**Шовную, или роликовую сварку**, применяют для получения прочных и плотных швов при изготовлении тонкостенных сосудов, предназначенных для хранения и транспортирования жидкостей, газов и других продуктов, а также в производстве тонкостенных труб.

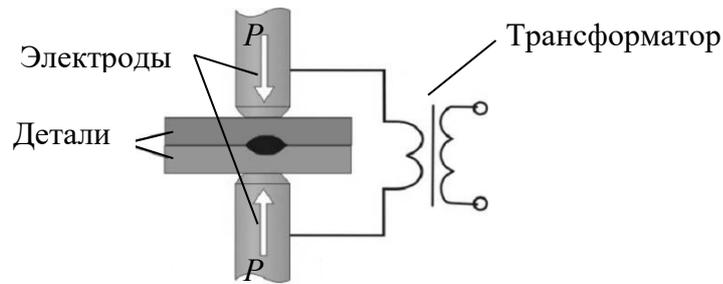


Рисунок 2.2 – Схема точечной сварки давлением

При шовной сварке детали толщиной 0,3...3 мм собирают внахлестку и затем зажимают усилием  $P$  между двумя медными роликами, к которым подводят электрический ток от сварочного трансформатора (рисунок 2.3). Одному или обоим роликам сообщает принудительное вращение специальный привод. При включении тока и одновременном вращении роликов происходит перемещение и нагрев до расплавления контактных поверхностей свариваемых изделий, которые под действием сжимающих усилий свариваются.

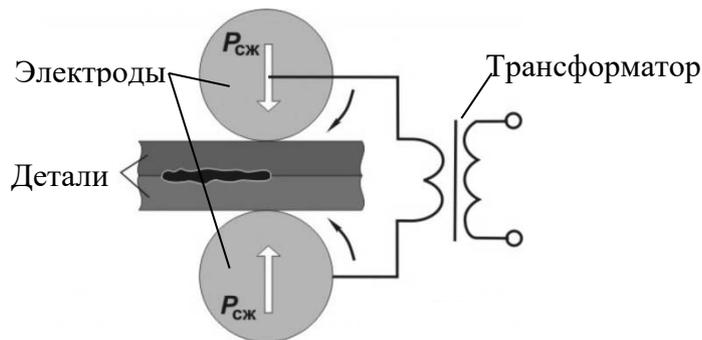


Рисунок 2.3 – Схема роликовой сварки давлением

Различают два основных способа шовной сварки: непрерывную и прерывистую.

## 2.2 Формирование структуры металла в зоне термического влияния сварных соединений

При сварке давлением (например, контактная сварка) сварной шов может иметь как литую структуру, так и пластически деформированную. Например, при контактной точечной сварке прохождение тока вызывает разогрев и расплавление металла в зоне сварки, создающее ядро сварной точки. Точечная сварка низкоуглеродистой стали без расплавления металла хотя и возможна, но недостаточно надежна и поэтому на практике почти не применяется.

Диаметр ядра, определяющий в основном прочность сварной точки, зависит от диаметра рабочей поверхности электрода, толщины листов, давления, силы тока и времени его прохождения. При неправильно подобранном режиме сварки может не произойти достаточного расплавления

металла, и получается непроваренная точка. Когда ядро расплавляется, прилегающая к нему по окружности зона металла находится в пластическом состоянии и плотно сжимается давлением электродов. Давление создает уплотняющее кольцо пластического металла, удерживающего жидкий металл ядра. При недостаточном давлении уплотняющее кольцо не может удержать жидкий металл ядра, и происходит внутренний выброс (выплеск) металла в зазор между листами.

Кристаллизация жидкого металла происходит так же, как и при электродуговой сварке, т. е. от поверхности ядра к его середине. Ядро имеет столбчатую дендритную структуру. При охлаждении и затвердевании происходит уменьшение объема расплавленного металла ядра. В результате в центральной части ядра могут образовываться усадочная раковина, пористость и рыхлость металла. Чем толще металл, тем сильнее неблагоприятное влияние усадки. Наиболее надежным способом борьбы с этим явлением может служить повышение рабочего давления.

При сварке давлением также имеется ЗТВ, однако ее общие размеры относительно малы и не оказывают решающего влияния на прочность сварного соединения.

### ***Порядок выполнения работы***

- 1 Ознакомиться с основными способами сварки давлением.
- 2 Изучить устройство, назначение и принцип работы сварочной машины контактной точечной сварки.
- 3 Произвести сварку цилиндрических деталей, располагая их под углом 90° друг к другу на режимах, указанных в таблице 2.1.
- 4 Составить отчет.

### **Порядок включения машины МТР 16073.**

- 1 Перед включением машины МТР 16073 необходимо проверить состояние электродов и при необходимости их зачистить.
- 2 Включить МТР 16073: «Питание 380В», «Электромеханический привод сжатия электродов», «Автоматическое охлаждение».
- 3 На панели управления выставить значения тока и времени согласно таблице 2.1.
- 4 Установить между электродами свариваемые детали, удерживая их.
- 5 Произвести сварку нажатием правой педали машины МТР 16073.

Таблица 2.1 – Общая высота свариваемых образцов

Время, с	Сила тока, кА				
	0,5	1	1,5	2	2,5
1					
2					

### ***Содержание отчета***

- 1 Цель работы.
- 2 Описание особенности ЗТВ при точечной сварке.
- 3 Таблица с результатами эксперимента.
- 4 Вывод.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 В чем сущность способов сварки давлением?
- 2 В чем отличие точечной сварки от роликовой?
- 3 Для чего используется стыковая сварка?
- 4 В чем отличие стыковой сварки непрерывным и прерывистым оплавлением?
- 5 Как влияет сила сварочного тока и время сварки на глубину проплавления и форму сварного соединения?

## **3 Лабораторная работа № 3. Ручная дуговая сварка и наплавка**

***Цель работы:*** ознакомиться с технологическими особенностями многослойной сварки и наплавки ручной дуговой сваркой.

### ***Оборудование и инструменты***

- 1 Инверторный сварочный аппарат.
- 2 Сварочные электроды.
- 3 Молоток.
- 4 Щетка металлическая.

### ***Порядок выполнения работы***

- 1 Ознакомиться с технологией ручной дуговой сварки.
- 2 Ознакомиться с технологическими особенностями формирования многослойных швов.
- 3 Изучить структуру многослойных швов, полученных ручной дуговой сваркой.
- 4 Составить отчет.

#### ***3.1 Общие сведения***

***Физическая сущность дуги.*** Сварочная дуга представляет собой мощный электрический разряд в газах, сопровождаемый выделением значительного ко-

личества тепла и света. С физической точки зрения это сложный ионный и электронный процесс переноса электрических зарядов через ионизированный воздушный промежуток. Ионизация газового промежутка при дуговой сварке в основном обусловлена электронной эмиссией с горячего катода.

Для разогрева катода между ним и анодом, подключенными к источнику сварочного тока, производят кратковременное короткое замыкание. После отрыва электрода от изделия с разогретого катода, каким при сварке постоянным током может быть и электрод, и изделие (при переменном токе полярность постоянно изменяется), под воздействием электрического поля начинается электронная эмиссия. Электроны, вылетевшие с поверхности катода, направляются к аноду и, сталкиваясь на своем пути с молекулами и атомами воздуха, ионизируют их. Образованные в воздушном промежутке отрицательные ионы и электроны перемещаются к аноду, а положительные ионы – к катоду. На поверхности катода осуществляется нейтрализация заряженных частиц с преобразованием электрической энергии в тепловую.

*Сущность способа.* Ручную дуговую сварку выполняют штучными электродами, которые сварщик подает к свариваемому изделию и перемещает в нужном направлении. Для сварки по методу Славянова используют металлические электроды, имеющие диаметр 1,6...12 мм и длину 150...450 мм.

Для защиты расплавленного металла от взаимодействия с воздухом на электродные стержни наносят толстые, или качественные, покрытия (рисунок 3.1).

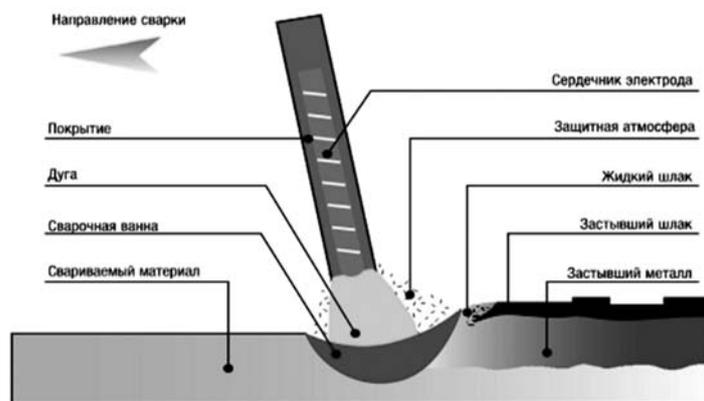


Рисунок 3.1 – Схема ручной дуговой сварки

Их составляющими, кроме стабилизирующих и клеящих (жидкое стекло), являются шлако- и газообразующие вещества и раскислители. Для получения наплавленного металла специального состава и свойств в них вводят также различные легирующие элементы.

### 3.2 Техника выполнения швов ручной дуговой сваркой

**Зажигание дуги.** Существует два способа зажигания дуги покрытыми электродами – прямым отрывом и отрывом по кривой. Первый способ называют зажиганием впритык. Второй напоминает движение при зажигании спички, и поэтому его называют чирканьем. Первый используется чаще, второй, как правило, применяют не опытные сварщики, т. к. в этом случае меньше вероятность приваривания электрода к изделию.

**Длина дуги.** Длина дуги должна быть постоянной. Увеличение длины дуги снижает устойчивое ее горение, глубину проплавления основного металла, повышает потери на угар и разбрызгивание электрода, вызывает образование шва с неровной поверхностью и усиливает вредное воздействие окружающей атмосферы на расплавленный металл. Нормальной считают длину дуги, равную  $0,5 \dots 1,1$  диаметра стержня электрода (в зависимости от типа и марки электрода и положения сварки в пространстве).

**Положение электрода.** Наклон электрода при сварке зависит от положения сварки в пространстве, толщины и состава свариваемого металла, диаметра электрода, вида и толщины покрытия.

Независимо от направления сварки положение электрода должно быть определенным: он должен быть наклонен к оси шва так, чтобы металл свариваемого изделия проплавлялся на наибольшую глубину. Для получения плотного и ровного шва при сварке в нижнем положении на горизонтальной плоскости угол наклона электрода должен быть  $15^\circ$  от вертикали в сторону ведения шва (рисунок 3.2).

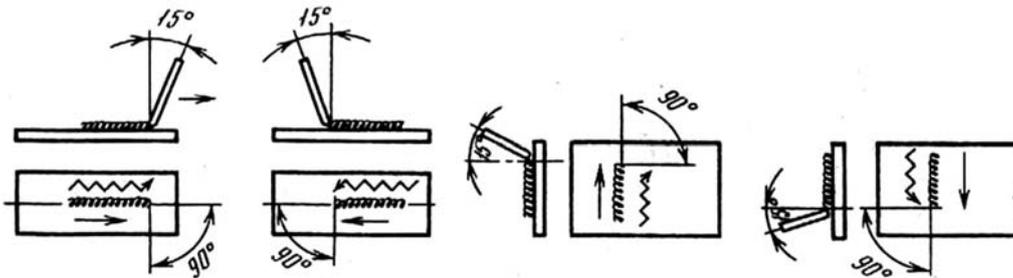
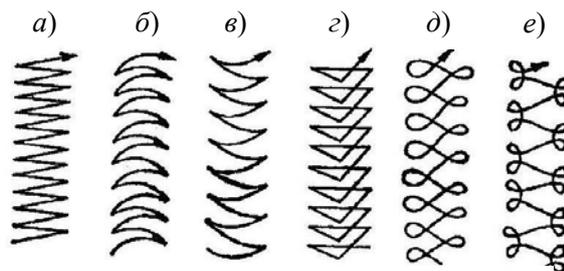


Рисунок 3.2 – Наклон электрода при ручной дуговой сварке

**Колебательные движения электрода.** Для получения валика нужной ширины производят поперечные колебательные движения электрода. Если перемещать электрод только вдоль оси шва без поперечных колебательных движений, то ширина валика определяется лишь силой сварочного тока и скоростью сварки и составляет от  $0,8$  до  $1,5$  диаметра электрода. Чаще всего применяют швы шириной от  $1,5$  до  $4$  диаметров электрода, получаемые с помощью поперечных колебательных движений электрода.

Наиболее распространенные виды поперечных колебательных движений электрода при ручной сварке (рисунок 3.3).



А–г – при обычных швах; д, е – при швах с усиленным прогревом кромок

Рисунок 3.3 – Основные виды поперечных движений конца электрода

### 3.3 Способы заполнения шва по длине и сечению

Швы по длине выполняют напроход и обратно-ступенчатым способом. Сущность способа сварки напроход заключается в том, что шов выполняется от начала до конца в одном направлении.

Обратноступенчатый способ состоит в том, что длинный шов делят на сравнительно короткие участки.

По способу заполнения швов по сечению различают однослойные швы (рисунок 3.4, а), многопроходные многослойные (рисунок 3.4, б) и многослойные (рисунок 3.4, в).



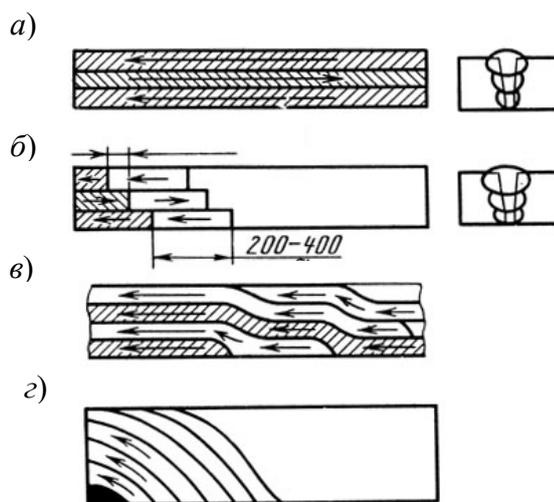
а – однослойный и однопроходной; б – многослойный и многопроходной; в – многослойный

Рисунок 3.4 – Сварные швы

Если число слоев равно числу проходов, то такой шов называют многослойным. Если некоторые из слоев выполняются за несколько проходов, то такой шов называют многопроходным.

Многослойные швы чаще применяют в стыковых соединениях, многопроходные – в угловых и тавровых.

Для более равномерного нагрева металла шва по всей его длине швы выполняются способами двойного слоя, секциями, каскадом и горкой, причем в основу всех этих способов положен принцип обратноступенчатой сварки (рисунок 3.5).



*a* – секциями; *б* – каскадом; *в, г* – горкой

Рисунок 3.5 – Схемы заполнения многослойного шва с малым интервалом времени

Сущность способа двойного слоя заключается в том, что наложение второго слоя производится по неостывшему первому после удаления сварочного шлака. Сварка на длине 200...400 мм ведется в противоположных направлениях. Этим предотвращается появление горячих трещин в шве при сварке металла толщиной 15...20 мм, обладающего значительной жесткостью.

При толщине стальных листов 20...25 мм и более для предотвращения трещины применяют сварку каскадом или горкой. Заполнение многослойного шва для сварки секциями и каскадом производится, как видно из рисунка 3.5, по всей свариваемой толщине на определенной длине ступени. Длина ступени подбирается такой, чтобы металл в корне шва имел температуру не менее 200 °С в процессе выполнения шва по всей толщине. В этом случае металл обладает высокой пластичностью, и трещин не образуется. Длина ступени при каскадной сварке равна 200...400 мм, а при сварке секциями – больше. Сварка горкой производится проходами по всей толщине металла. Способ сварки выбирается в зависимости от химического состава и толщины металла, числа слоев и жесткости свариваемого изделия.

Многослойная сварка имеет перед однослойной следующие преимущества.

1 Уменьшается объем сварочной ванны, в результате чего скорость остывания металла возрастает и размер зерен уменьшается.

2 Химический состав металла шва близок к химическому составу наплавленного металла, т. к. малая сила сварочного тока при многослойной сварке способствует расплавлению незначительного количества основного металла.

3 Каждый последующий слой шва термически обрабатывает металл предыдущего слоя, и околошовный металл имеет мелкозернистую структуру с повышенной пластичностью и вязкостью.

Каждый слой шва должен иметь толщину 3...5 мм (при сварке низкоуглеродистой стали) в зависимости от силы сварочного тока.

При сварочном токе 100 А дуга расплавляет металл верхнего слоя на глубину около 1,5 мм, а металл нижнего слоя (глубина – более 1,5 мм) нагревается от 1500 до 1100 °С и при быстром охлаждении образует мелкозернистую литую структуру.

При сварочном токе 200 А толщина слоя может быть увеличена до 5 мм, а термическая обработка нижнего слоя произойдет на глубине около 2,5 мм.

Термическая обработка металла корневого шва с получением мелкозернистой структуры осуществляется нанесением подварочного валика, который выполняется электродом диаметром 3 мм при сварочном токе 100 А.

Термическая обработка металла верхнего слоя выполняется нанесением отжигающего (декоративного) слоя. Толщина отжигающего слоя должна быть минимальной (1...2 мм), обеспечивающей высокую скорость остывания и мелкозернистую структуру верхнего слоя.

**Окончание шва.** В конце шва нельзя сразу обрывать дугу и оставлять на поверхности металла кратер. Кратер может вызвать появление трещины в шве вследствие содержания в нем примесей, прежде всего серы и фосфора. Лучшим способом окончания шва будет заполнение кратера металлом за счет прекращения поступательного движения электрода вниз и медленного удлинения дуги до ее обрыва.

### ***Порядок выполнения работы***

- 1 Включить сварочный инвертор.
- 2 В зависимости от диаметра электрода выставить необходимую силу тока. Зажечь сварочную дугу.
- 3 Параллельно на минимальном расстоянии друг от друга наплавить три валика длиной 50...70 мм.
- 4 Зачистить наплавленные валики.
- 5 На полученные валики сверху наплавить валики между первым и вторым (четвертый валик) и между вторым и третьим (пятый валик).
- 6 Зачистить наплавленные валики.
- 7 Между четвертым и пятым наплавить шестой валик.
- 8 Зачистить наплавленный металл от шлака и брызг и оценить качество наплавленного материала в целом.
- 9 На образцах изучить структуру многослойных швов, полученных ручной дуговой сваркой.

### ***Содержание отчета***

- 1 Титульный лист.
- 2 Цель работы.
- 3 Описание выполнения технологии многослойных швов.
- 4 Сделать вывод о качестве многослойной наплавки ручной дуговой сваркой.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Как влияет длина дуги на стабильность процесса сварки?
- 2 В чем заключается сварка каскадом?
- 3 Для чего выполняют колебательные движения электродом?
- 4 Какие способы зажигания дуги Вы знаете?
- 5 Перечислите преимущества многослойной сварки.

## **4 Лабораторная работа № 4. Сварка и наплавка в среде углекислого газа**

**Цель работы:** ознакомиться с технологическими особенностями многослойной сварки и наплавки в среде защитных газов. Изучить образцы, полученные многослойной наплавкой в среде защитных газов.

### **Оборудование и материалы**

- 1 Сварочный полуавтомат Kemract MIG 2530.
- 2 Проволока сварочная СВ 08 Г2С (0,7...1,2 мм)
- 3 Баллон с углекислотой.
- 4 Пластины из стали (4 × 100 × 100 мм).

### **4.1 Общие сведения**

**4.1.1 Сварка в углекислом газе.** Сварка в  $\text{CO}_2$  является основным и наиболее распространенным способом сварки плавлением на машиностроительных предприятиях. Она экономична, обеспечивает достаточно высокое качество швов, особенно при сварке низкоуглеродистых сталей, требует более низкой квалификации сварщика, чем ручная, позволяет выполнять швы в различных пространственных положениях.

Наиболее распространена сварка полуавтоматами. При сварке в защитном газе плавящимся электродом защитный газ, выходя из сопла, вытесняет воздух из зоны сварки (рисунок 4.1). Сварочная проволока подается вниз роликами, которые вращаются двигателем подающего механизма. Подвод сварочного тока к проволоке осуществляется через скользящий контакт (контактный наконечник).

**4.1.2 Технология полуавтоматической сварки.** Сварка в углекислом газе выполняется при значительно больших плотностях тока (более  $100 \text{ А/мм}^2$ ), чем при сварке покрытыми электродами ( $i \approx 10...12 \text{ А/мм}^2$ ). Сварка ведется в жесткой и частично в возрастающей зонах вольт-амперной характеристики дуги. Это обеспечивает в совокупности с дополнительными технологическими мероприятиями переход на мелкокапельный и даже струйный перенос металла.

В результате улучшается качество сварного шва и уменьшается разбрызгивание.

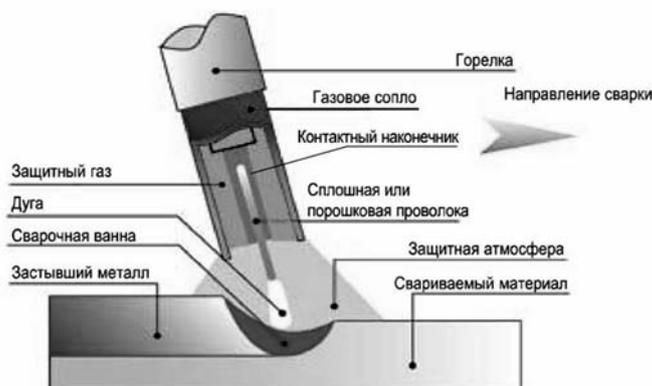


Рисунок 4.1 – Схема процесса сварки в защитных газах плавящимся электродом

Условия формирования шва существенно зависят от режима сварки. Так, повышение напряжения на дуге (например, при увеличении длины дуги) приводит к увеличению времени контакта капли расплавленного металла с газом и увеличению степени выгорания раскислителей.

Одновременно с этим уменьшается значение коэффициентов плавления и наплавки вследствие увеличения потерь тепла на излучение в окружающее пространство, а также потерь металла на разбрызгивание и угар.

*4.1.3 Механизированная наплавка в  $CO_2$ .* Наплавка в среде углекислого газа в части применяемого оборудования для закрепления детали и подачи электродной проволоки практически не отличается от сварки. Ток к электродной проволоке подводится через мундштук и наконечник, расположенные внутри газопровода горелки.

При наплавке в среде  $CO_2$ , по сравнению со сваркой под флюсом и ручной дуговой сваркой, наблюдается меньшее тепловложение в материал, следовательно имеется возможность обработки деталей небольшого диаметра. Отсутствует трудоемкая операция по отделению шлаковой корки, а наплавка может производиться при любом пространственном положении детали. Производительность процесса по площади покрытия на 20...30 % выше.

Недостатками процесса является: повышенное разбрызгивание металла, и необходимость применения легированной проволоки для получения наплавленного металла с требуемыми свойствами.

Наплавку в среде углекислого газа производят на постоянном токе обратной полярности. Тип и марку электродной проволоки выбирают в зависимости от требуемых физико-механических свойств наплавленного металла. В зависимости от силы сварочного тока выбирается скорость подачи проволоки, устанавливаемая с таким расчетом, чтобы в процессе наплавки не было коротких замыканий и обрывов дуги. Скорость наплавки определяется в основном толщиной наплаваемого металла и качеством формирования наплавленного слоя. Наплавку валиков осуществляют с шагом 2,5...3,5 мм при

условии, что последующий валик перекроет предыдущий не менее чем на 1/3 его ширины.

Марка и тип электродной проволоки определяют твердость наплавленного металла. Её диаметр влияет на расход углекислого газа. На этот же параметр влияют также скорость наплавки и конфигурация изделия.

В промышленности применяют различные способы электродуговой сварки и наплавки в среде защитных газов: в аргоне, гелии, углекислом газе. Эти способы во многих случаях позволяют восстанавливать или упрочнять поверхности изделий, наплавка которых другими способами затруднена.

От расстояния, угла наклона и характера движения горелки зависят надежность газовой защиты зоны сварки от воздуха, скорость охлаждения металла, форма шва, условия удаления газовых пузырей и неметаллических включений из сварочной ванны.

Процесс наплавки в углекислом газе необходимо вести на короткой дуге. При сварке на токах 200...250 А длина дуги должна быть в пределах 1,5...4,0 мм, т. к. увеличение длины дуги повышает разбрызгивание жидкого металла и вызывает угар легирующих элементов.

Для наплавки стальных и чугунных изделий в среде углекислого газа применяется проволока диаметром от 0,8 до 3 мм марок Св-12ГС, Св-08Г2С, Св-Х13, Св-Х17, Св-06Х19НТ, Св-18ХМА, Св-08Х20Н9Г7Т. Также используют порошковые проволоки, например ПП-18Т, ПП-4Х2В8Т, ПП-Х12ВФТ.

Использование для наплавки проволок марок Св-12ГС, Св-08ГС, Св-08Г2С дает наплавленный металл не очень высокой твердости и износостойкости. Такие проволоки применяются в основном для восстановления геометрических параметров изделия.

При наплавочных работах нет необходимости получать глубокое проплавление основного металла. Поэтому основными факторами являются: устойчивое горение дуги, производительность и качество наплавочных работ.

### ***Порядок выполнения работы***

- 1 Включить сварочный полуавтомат.
- 2 В зависимости от диаметра проволоки выставить необходимую силу тока.
- 3 Параллельно на минимальном расстоянии друг от друга наплавить три валика длиной 50...70 мм.
- 4 На полученные валики сверху наплавить валики между первым и вторым (четвертый валик) и между вторым и третьим (пятый валик).
- 5 Между четвертым и пятым наплавить шестой валик.
- 6 Зачистить место сварки и оценить качество наплавленного материала в целом.
- 7 На образцах изучить структуру многослойных швов, полученных наплавкой в среде CO<sub>2</sub>.

## ***Содержание отчета***

- 1 Титульный лист.
- 2 Цель работы.
- 3 Описание особенностей наплавки в углекислом газе.
- 4 Вывод о качестве многослойных швов, полученных наплавкой в среде CO<sub>2</sub>.

## ***Контрольные вопросы***

- 1 В чем сущность сварки и наплавки в защитных газах?
- 2 Перечислите преимущества и недостатки наплавки в CO<sub>2</sub>.
- 3 Какие марки сварочных проволок используются при наплавке в CO<sub>2</sub>?
- 4 От чего зависит химический состав наплавочной проволоки?
- 5 В чем отличие наплавки в CO<sub>2</sub> от ручной дуговой наплавки?

## **5 Лабораторная работа № 5. Плазменная наплавка**

***Цель работы:*** изучить основные узлы оборудования для плазменной наплавки. Исследовать образцы деталей с покрытиями, полученными плазменной наплавкой.

***Оборудование и материалы:*** комплекс оборудования для плазменной наплавки, баллон с аргоном, материалы для наплавки.

### ***5.1 Общие сведения***

Процесс пламенно дуговой наплавки представляет собой поток полностью ионизированного газа, который обладает электропроводностью и имеет высокую температуру. Поток создается при помощи специального устройства, в котором создается электрический разряд в виде дуги при ее обдуве потоком газа. Устройства, которые позволяют получить плазменную струю, называются **плазмотроны**.

Сжатие дуги осуществляется за счет размещения ее в плазмотроне, стенки которого интенсивно охлаждаются водой. В результате сжатия уменьшается поперечное сечение дуги и возрастает ее мощность – количество энергии, приходящееся на единицу площади. Температура в столбе обычной дуги, горящей в среде аргона и паров железа, составляет  $5 \cdot 10^3 \dots 7 \cdot 10^3$  °С. Температура плазменной дуги достигает  $3 \cdot 10^4$  °С.

Одновременно со сжатием в зону плазменной дуги вдувается плазмообразующий газ, который нагревается дугой, ионизируется и в результате теплового расширения увеличивается в объеме в 50–100 раз. Это заставляет газ истекать из канала сопла плазмотрона с высокой скоростью. Кинетическая энергия движущихся ионизированных частиц плазмообразующего газа дополняет тепло-

вую энергию, выделяющуюся в дуге в результате происходящих электрических процессов. Поэтому плазменная дуга является более мощным источником энергии, чем обычная.

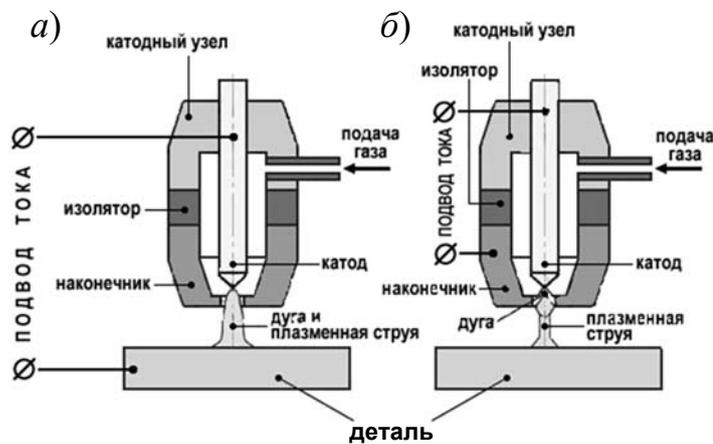
Основными чертами, отличающими плазменную дугу от обычной, являются:

- более высокая температура;
- меньший диаметр дуги;
- цилиндрическая форма дуги (в отличие от обычной конической);
- давление дуги на металл в 6–10 раз выше, чем у обычной;
- возможность поддерживать дугу на малых токах (0,2...30 А).

Возможны две схемы процесса:

1) наплавка плазменной дугой, когда дуга горит между неплавящимся электродом и изделием (рисунок 5.1, а);

2) наплавка плазменной струей, когда дуга горит между неплавящимся электродом и соплом плазмотрона и выдувается потоком газа (рисунок 5.1, б).



а – дуга прямого действия; б – дуга косвенного действия

Рисунок 5.1 – Принципиальная схема процесса плазменно-дуговой наплавки

Первая схема наиболее распространена. В качестве плазмообразующего газа при наплавке используется обычно аргон, иногда с добавками гелия или водорода. В качестве защитного газа используется чаще всего также аргон. Материал электрода – вольфрам, активированный иттрием, лантаном или торием, а также гафний и медь.

Она может обеспечивать более глубокое проплавление металла при одновременном уменьшении объема его расплавления. На рисунке 5.2 приведена форма проплавления для обычной дуги и плазменной. Видно, что плазменная дуга – более концентрированный источник нагрева.

**Преимущества плазменно-дуговой сварки и наплавки металлов по сравнению с обычными способами.**

1 Плазменный сварочный аппарат можно использовать в работе практически со всеми металлами – сталь, чугун, плазменная сварка алюминия и его сплавов.

2 Плазменная наплавка и сварка отличаются высокой производительностью и качеством наплавленного слоя.

3 При наплавке и сварке металл деформируется значительно меньше.

4 В качестве присадочного материала можно использовать не только проволоку, но и порошки, что существенно расширяет номенклатуру присадочных материалов.

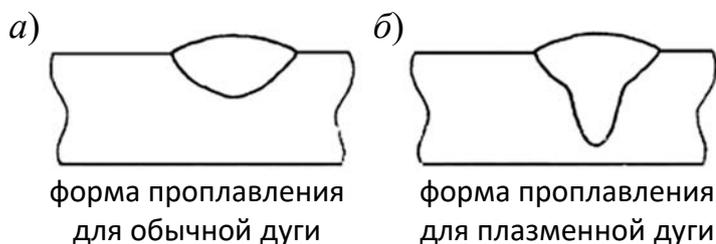


Рисунок 5.2 – Форма проплавления для обычной (а) и плазменной (б) дуги

### ***Порядок выполнения работы***

1 Включить установку плазменной наплавки.

2 Параллельно на минимальном расстоянии друг от друга наплавить три валика длиной 50...70 мм.

3 На полученные валики сверху наплавить валики между первым и вторым (четвертый валик) и между вторым и третьим (пятый валик).

4 Между четвертым и пятым наплавить шестой валик.

5 Зачистить наплавленный металл и оценить качество наплавленного материала в целом.

6 На образцах изучить структуру многослойных швов, полученных плазменной наплавкой.

### ***Содержание отчета***

1 Титульный лист.

2 Цель работы.

3 Описание особенностей технологии плазменной наплавки.

4 Вывод о качестве многослойных швов, формируемых плазменной наплавкой.

### ***Контрольные вопросы***

1 Что представляет собой плазма?

2 По каким признакам классифицируют плазмотроны.

3 Перечислите основные элементы конструкции плазмотрона.

4 Преимущества плазменной наплавки и сварки.

## 6 Лабораторная работа № 6. Сварка пластмасс

**Цель работы:** изучить оборудование и технологию сварки пластмасс; приобрести практические навыки по их сварке; оценить качество сварных пластмассовых соединений.

**Оборудование и материалы:** промышленный фен для сварки пластмасс; термопласт листовой, присадочный материал в виде прутка, перчатки кожаные.

### 6.1 Общее положение

Сварка полимерных материалов – один из методов создания неразъемного соединения элементов конструкции. В результате сварки между соединяемыми поверхностями исчезает граница раздела, превращаясь в размытый переходный слой. Прочность соединения обуславливают возникающие в этом слое силы межатомного и межмолекулярного взаимодействия. В случае сварки линейных или разветвленных полимеров (термопластов и термоэластопластов) переходный слой образуется в результате диффузии макромолекул полимера, которая возможна при переходе полимера в вязкотекучее состояние. Последнее реализуется при нагревании свариваемых материалов или при действии на них растворителя. *В соответствии с этим различают диффузионную тепловую сварку и диффузионную сварку с помощью растворителя.* Прочное сварное соединение лестничных или трехмерных полимеров, которые невозможно перевести в расплав или раствор, может быть образовано при химическом взаимодействии макромолекул между собой или с введенным в зону сварки сшивающим агентом. *Такой способ создания соединения называется химической сваркой.* Его используют также для сварки некоторых кристаллических или ориентированных термопластов, когда стремятся в максимальной степени предотвратить нарушение структуры свариваемых материалов.

Источники нагрева при сварке – нагретые газ, инструмент, присадочный материал или тепло, генерируемое в материалах в результате преобразования различных видов энергии – токов высокой частоты (ТВЧ), ультразвука, трения, ИК- или лазерного излучения. Сварку предпочитают другим методам создания неразъемного соединения полимерных материалов (склеиванию, креплению заклепками, при формовке, прессовой посадке) в тех случаях, когда:

- соединяемые детали изготовлены из одинаковых материалов или из материалов с близкими значениями плотности энергии когезии;
- недопустимо присутствие чужеродных по отношению к соединяемым материалам крепежных элементов или клеевых прослоек;
- важнейшими требованиями к процессу являются высокая производительность и возможность механизации и автоматизации. Неразъемность сварных узлов, трудности, возникающие при соединении разнородных материалов, а также низкая прочность швов при расслаивающих нагрузках ограничивают применение сварки.

Как правило, полимеры из твердого состояния в пластическое переходят постепенно, поэтому используется понятие *области температур размягчения*. Для большинства материалов данная область лежит в достаточно узком температурном интервале, отклонение от которого может привести к значительному снижению механических свойств образуемого соединения. Одной из важнейших причин является низкая температура разложения термопластов. Это температура, при которой материал разлагается, т. е. запас энергии макромолекул становится настолько большим, что они расщепляются на более мелкие, которые могут вступать в реакции между собой и элементами окружающей среды, например, с водой, кислородом. В результате образуются новые химические соединения, при этом пластмасса утрачивает первоначальные свойства. Диапазоны размягчения (плавления) некоторых полимеров указаны на рисунке 6.1.

<b>Термопластик</b>	<b>Диапазон размягчения/плавления (°С)</b>
Поливинилацетат	35- 85
Полистирол	70-115
Поливинилхлорид	75- 90 (размягчение)
Полиэтилен, плотность 0.92 г /см <sup>3</sup>	~ 110
Полиэтилен, плотность 0.94 г /см <sup>3</sup>	~ 120
Полиэтилен, плотность 0.96 г /см <sup>3</sup>	~ 135
Полибутен-1	125-135
Поливинилиден хлорид	115-140 (размягчение)
Полиметилметакрилат	120-160
Ацетат целлюлозы	125-175
Полиакрилонитрил	130- 150 (размягчение)
Полипропилен	160 - 170
Полиоксиметилен	165 - 185
Нейлон 12	170 - 180
Нейлон 11	180 - 190
Политрифторхлорэтилен	200 - 220
Нейлон 6,10	210 - 220
Нейлон 6	215 - 225
Полибутилентерефталат	220 - 230
Поликарбонат	220 - 230
Полиэфирсульфон	228 - 230
Поли-4-метилпентен-1	230-240
Нейлон 6,6	250-260
Полиэтилентерефталат	250-260

Рисунок 6.1 – Диапазоны температур размягчения (плавления) термопластов

## **6.2 Основные способы сварки пластмасс**

**Сварка нагретым инструментом.** Соединяемые детали нагреваются в результате контакта с металлическими брусками, лентами, дисками, пластинками или с другим инструментом. Нагретые детали спрессовывают, а затем охлаждают. Инструментом может быть нагрета внешняя поверхность деталей или сами соединяемые поверхности. В первом случае различают контактно-тепловую сварку прессованием (детали нагревают и спрессовывают одновременно) и термоимпульсную сварку.

При контактно-тепловой сварке прессованием используют постоянно нагретый инструмент с большой теплоемкостью. Детали нагревают с одной или с двух сторон (двухсторонний нагрев облегчает сварку). Необходимая температура в месте сварки толстостенных деталей устанавливается лишь спустя некоторое время после их соприкосновения с инструментом. Длительность разогрева материала в месте соединения уменьшается до нескольких минут при использовании инструмента, нагретого на 20...50 °С выше температуры текучести полимера (в зависимости от толщины детали). Однако при этом повышается опасность термодеструкции полимера. Перегрев поверхности нежелателен также и потому, что инструмент, оказывая давление на размягченный материал, деформирует его в зоне шва. Деформирование уменьшают, применяя ограничители хода инструмента или распределяя давление на зону, ширина которой превышает ширину зоны шва. Чтобы исключить прилипание пластмассы к инструменту, применяют разделительные прокладки из фторопласта-4, полиамида.

Детали могут быть соединены одновременно по всей поверхности шва; протяженные швы образуются в результате ряда последовательных операций. Для непрерывного получения шва значительной длины, например при сварке пленочных изделий, может быть использована как ручная, так и механизированная сварка.

Для термоимпульсной сварки используют малоинерционный нагреватель (ленту или проволоку), через который периодически пропускают электрический ток. При его отключении сварной шов быстро охлаждается. Наиболее распространенная схема термоимпульсной сварки применяется для соединения пленок, главным образом полиолефиновых, толщиной 20...250 мкм.

В некоторых случаях нагревательные элементы помещают между соединяемыми поверхностями, нагревают их и оставляют в сварном шве. Если нагрев ведут электрическим током, то в качестве нагревателя применяют спираль из металла с высоким электрическим сопротивлением. Наиболее детально этот способ разработан для соединения труб с фитингами. При нагреве электромагнитным высокочастотным полем используют, кроме металлических вкладышей, тонкоизмельченную окись железа, которую наносят на соединяемые поверхности или вводят в поверхностные слои детали.

**Сварка трением.** При использовании этого способа детали нагреваются в результате выделения теплоты трения. В зависимости от способа создания трения различают сварку вращением, инерционную сварку и сварку вибротрением.

При сварке вращением в контакт приводят соосно закрепленные детали, одна из которых неподвижна, а другая вращается. После достижения необходимой температуры (обычно через 3...25 с после начала вращения) деталь останавливают и охлаждают сварной шов под давлением. Иногда, в частности при сварке длинных деталей, используют вращающийся промежуточный элемент (в этом случае обе соединяемые детали закрепляют неподвижно), который может быть изготовлен из металла, например алюминия, или из пластмассы. Элемент из пластмассы оставляют в сварном шве, а металлический удаляют, после чего соединяемые детали приводят в контакт и охлаждают.

Сваркой вращением соединяют стержни и трубы, а также присоединяют цилиндрические детали к плоским и фасонным. Высокая скорость образования шва – основное достоинство этого метода. Прочность соединений, полученных при оптимальных режимах сварки, близка к прочности свариваемого материала. Установки для сварки вращением изготавливают на базе токарных или сверлильных станков.

Инерционная сварка происходит при вращении деталей за счет энергии, запасаемой вращающимся маховиком (его масса составляет 1...2 кг на 1 см<sup>2</sup> свариваемой поверхности). Длительность нагрева (время торможения) обычно менее 2 с, суммарное уменьшение размеров соединяемых деталей, обусловленное интенсивным трением, не превышает десятых долей мм.

Сварка вибротрением осуществляется в результате прямо- или криволинейных колебаний одной детали относительно другой при их плотном контакте. Частота колебаний составляет 50...400 Гц, максимальная амплитуда – 6 мм, давление контакта – 0,2...1,5 кН/см<sup>2</sup>. Продолжительность сварки, не зависящая от толщины детали, составляет несколько секунд.

**Сварка газовым теплоносителем.** Образование сварных соединений при сварке газовым теплоносителем так же, как и при других методах сварки, возможно только при условии, если соединяемые поверхности материала и присадочного прутка находятся в вязкотекучем состоянии, поэтому температура газа-теплоносителя на выходе из сопла сварочного аппарата должна на 50...100 °С превышать температуру текучести полимера (при условии, если расстояние между срезом сопла и свариваемыми поверхностями минимально и составляет 5...6 мм).

Расход газа-теплоносителя зависит от типа и толщины свариваемого материала, диаметра сопла сварочного аппарата, формы и площади сечения присадочного материала. При сварке поливинилхлорида, полиэтилена, полипропилена и пентапласта рекомендуется расход газа, равный  $(0,3 \pm 0,09)$  м<sup>3</sup>/ч на 1 мм<sup>2</sup> сечения сопла сварочного аппарата. Давление газа-теплоносителя при сварке

термопластов невелико и составляет 0,006...0,15 МПа. Рекомендуемые параметры выполнения сварки термопластов представлены в таблицах 6.1 и 6.2.

Таблица 6.1 – Режимы работы сварочного устройства при сварке термопластов газовым теплоносителем с присадочным прутком

Материал	Газ-теплоноситель	Давление, МПа	Расход, м <sup>3</sup> /ч	Расход через 1 мм сечения, м <sup>3</sup> /ч
Винипласт	Воздух	0,03...0,06	1,5...2,0	0,3 ± 0,09
Пластикат ПВХ	Воздух	0,03...0,06	1,5...2,0	
ПЭВД	Азот	0,03...0,07	0,9...2,4	
ПП	Азот	0,03...0,06	1,8...2,4	
ПЭНД	Азот	0,04...0,07	0,9...2,4	
Пентапласт	Воздух	0,07...0,15	2...3	–
Поликарбонат	Воздух	0,03...0,06	1,2...1,8	–
ПММА	Воздух	0,03...0,06	0,7...1,5	–
Полиамид	Азот	0,03...0,06	0,6...0,7	–

Таблица 6.2 – Режимы сварки термопластов газовым теплоносителем с присадочным прутком

Материал	Температура, °С		Скорость, м/мин, при диаметре присадочного прутка, мм		Усилие вдавливания прутка, Н
	на выходе из сопла	на расстоянии 6 мм от сопла	3	4	
Винипласт	250...350	200 ± 15	0,17	0,13	3
Пластикат ПВХ	180...210	–	0,6	–	3
ПЭВД	–	240 ± 15	0,17	0,13	3
ПП	–	200 ± 15	0,17	0,13	3
ПЭНД	–	250 ± 15	0,17	0,13	3
Пентапласт	–	300 ± 15	0,17	0,13	3
Поликарбонат	450...500	–	0,3...0,6	–	1,5...2
ПММА	350...400	300 ± 15	–	–	0,2...0,3
Полиамид	140...280	–	0,07...0,1	–	0...0,2

Положение шва при сварке может быть самое разнообразное (горизонтальное, вертикальное, смешанное). Сваркой газовыми теплоносителями могут быть выполнены швы практически всех типов соединений – стыковых, нахлесточных, угловых и тавровых.

### **6.3 Технология выполнения сварки газовым теплоносителем**

Перед началом сварки необходимо по возможности точно устанавливать температуру истекаемых из сопла горелки газов. При низкой температуре нагретого воздуха сварное соединение будет непрочным и легко разрушится.

При высокой температуре воздуха, поступающего из горелки, обугливаются кромки сварного соединения, что вызывает разложение пластмассы с выделением едкого газа. Температуру теплоносителя рекомендуется контролировать термопарой. Чаще всего из всех пластмасс сваривают винипласты. Винипласт переходит в вязкотекучее состояние при температуре 200...220 °С. При толщине материала более 2...3 мм применяют V-образную разделку кромок под сварку. Сварку начинают с предварительного подогрева места сварки. При нагреве пластмасса приобретает характерный блеск, и это указывает на ее вязкотекучее состояние. Затем конец присадочного прутка вертикально вдавливают в это место с одновременным подогревом его. Пруток разогревают по периферии до вязкотекучего состояния, тогда как его стержень (центральная часть) находится в твердом эластичном состоянии, способствуя вдавливанию его и сварке с кромками. Кромки и присадочный прутки должны равномерно нагреваться.

Сварка газовым теплоносителем применима и для пленок, без использования присадочного материала. В этом случае сварка осуществляется путем нагрева струей газа непосредственно свариваемых поверхностей. Сопло сварочного аппарата при этом вводят между соединяемыми пленками, после чего начинается его перемещение и подача горячего газа, а затем нагретые пленки сдавливают прижимным устройством.

Сварные соединения, полученные при оптимальных режимах сварки, имеют прочность при расслаивании, равную 80...90 % прочности основного материала, а прочность при сдвиге, практически равную прочности материала.

### ***Порядок выполнения работы***

- 1 Изучить устройство газоплазменной горелки для сварки пластмасс.
- 2 Из листового материала термопласта вырезать (выпилить) две пластины размером 50 × 20 мм.
- 3 Подобрать и установить режим сварки (температуру теплоносителя, диаметр присадочного прутка).
- 4 На пластинах из термопласта произвести напильником разделку кромок.
- 5 Закрепить пластины разделанными кромками друг к другу в лабораторных зажимах и сварить прутками из соответствующего пластинам материала.
- 6 После остывания образцов до комнатной температуры осмотреть шов и визуально оценить его качества.
- 7 Произвести испытание образцов на разрывной машине и результаты сравнить с прочностью термопласта до сварки.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Перечислите основные способы сварки термопластов.
- 2 Какая группа пластмасс подвергается сварке с использованием теплоносителей?

- 3 Чем отличается сварка пластмасс от сварки металлов?
- 4 От чего зависит температура нагретого газа при сварке пластмасс?
- 5 Что происходит с полимерами при нагреве их до температуры выше допустимой?

### ***Содержание отчета***

- 1 Титульный лист.
- 2 Цель работы.
- 3 Технология получения сварных соединений с использованием нагретого газа.
- 4 Вывод по проделанной работе.

## **7 Лабораторная работа № 7. Газопламенная наплавка оплавлением**

***Цель работы:*** приобрести навыки по выбору режима наплавки; изучить образцы, полученные газопламенной наплавкой.

***Оборудование и материалы:*** пост газовой сварки; пластины из низкоуглеродистой стали; высокотемпературный припой диаметром 2...4 мм; прокаленная бура; мел.

### ***7.1 Общее положение***

Наплавкой называется нанесение слоя расплавленного металла необходимого состава на поверхность изделия. При помощи наплавки можно увеличить или восстановить размеры изделия, а также получить поверхностный слой металла, обладающий высокой твердостью, износоустойчивостью, коррозионной стойкостью, жаропрочностью и т. д. Наплавлять можно сталью, цветными металлами и твердыми сплавами.

При газовой наплавке цветных металлов на предварительно зачищенную поверхность направляют пламя и нагревают ее до температуры плавления наплавляемого металла. Наплавлять можно один или несколько слоев. Для очистки нагретой поверхности от окислов применяют те же флюсы, что и для пайки. Таким образом, физические процессы, происходящие при наплавке, во многом аналогичны процессам пайки. Здесь также происходит смачивание наплавляемой поверхности и образование на границе оплавления твердых растворов в результате диффузии. Для наплавки меди необходимо нормальное пламя, наплавку латуни производят с избытком кислорода. Образующиеся при этом окислы предохраняют цинк от испарения.

Твердые сплавы наплавляют для придания твердости и износоустойчивости рабочим поверхностям трущихся деталей. В зависимости от способа производства твердые сплавы делятся на спеченные или металлокерамические, литые

(стеллит, сормайт), порошкообразные или зернистые (вокар) и трубчато-зернистые (релит). Газовым пламенем наплавляются литые и трубчато-зернистые твердые сплавы, т. к. порошкообразные твердые сплавы сдуваются пламенем горелки, а керамические легко перегреваются.

Наплавку сармайта на сталь производят следующим образом: деталь, подлежащую наплавке сплавом, предварительно нагревают науглероживающим пламенем до запотевания поверхности, а затем наплавляют слой сармайта. Растекаясь по оплавленной поверхности стали, сармайт сплавляется с ней, образуя прочное соединение.

*Газопорошковая наплавка* позволяет упрочнять детали сложной конфигурации слоем минимальной толщины (0,1...0,3 мм) без разбавления основным металлом, т. к. зона перехода составляет всего 100...120 мкм. Для наплавки используют специальные горелки.

Кислород по трубке поступает через инжектор 10 в камеру смешения 9. Ацетилен по трубке 7 подается в канал 6, окружающий инжектор. Из канала 6 ацетилен инжектируется струей кислорода, вытекающего из инжектора, в камеру смешения 9, где газы смешиваются, по трубке 5 поступают в мундштук 1 и, выходя из него, сгорают, образуя сварочное пламя 2. После установления необходимого состава пламени и разогрева детали открывают отсекающий порошок (рисунок 7.1). Из бункера 13 порошок под действием собственного веса и инжектирующего действия кислородной струи, выходящей из инжектора 12, попадает в смесительную камеру 11, где смешивается с кислородом. Поток кислородно-порошковой смеси поступает в инжектор 10, обеспечивая инжекцию горючего газа – ацетилена. На выходе из мундштука ацетилено-кислородная смесь горит в виде пламени, которое обеспечивает необходимый нагрев наплавляемой поверхности 4 и частиц порошка, создавая общую сварочную ванну 3.

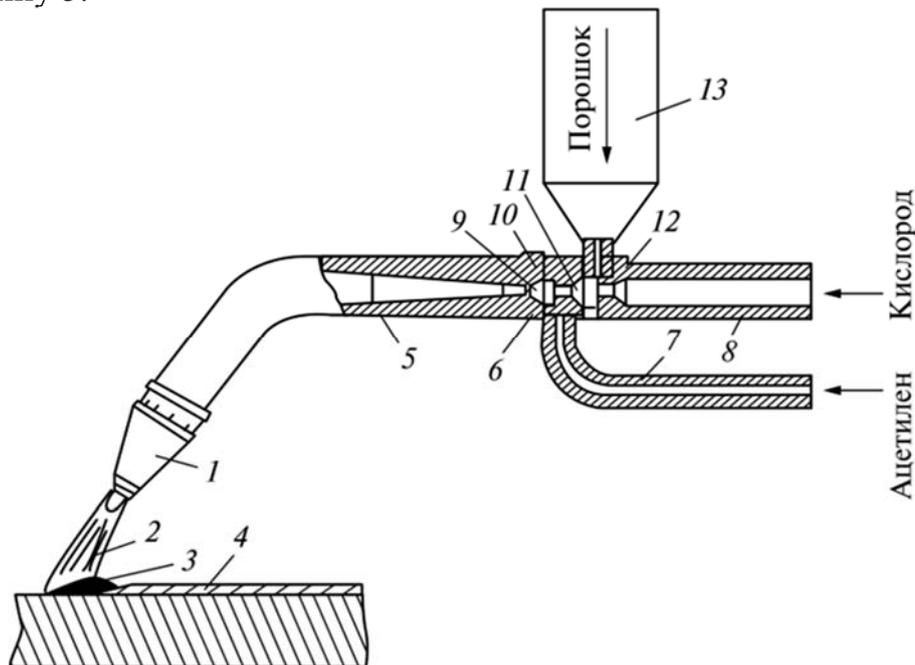


Рисунок 7.1 – Горелка для газопорошковой наплавки

*Газопламенное напыление с последующим оплавлением (наплавка напылением)* позволяет наносить тонкий износостойкий слой без деформации изделия, и основано на применении сплавов «никель–хром–кремний–бор» в виде порошков с температурой плавления 1020...1080 °С. Данные сплавы являются самофлюсующимися, т. к. при плавлении образуют защитные стеклообразные шлаки. Технологически способ состоит из двух процессов – напыления покрытия и его оплавления. Процесс газопламенного напыления включает в себя нагрев материала до жидкого состояния, его распыление газовой струей и нанесение с большой скоростью на обрабатываемую поверхность. При ударе частицы соединяются между собой и с поверхностью, образуя напыленный слой. Поверхность изделия перед напылением подвергают пескоструйной обработке. Для напыления используют газопламенные горелки порошкового типа, в частности те, которые применяют для газопорошковой наплавки.

### ***Порядок выполнения работы***

- 1 Зачистить до металлического блеска на поверхности стальной пластины участок, шириной 30...40 мм.
- 2 При помощи мела и линейки нанести на участок две параллельные линии на расстоянии 15...20 мм друг от друга.
- 3 Зажечь горелку и отрегулировать пламя с избытком кислорода.
- 4 Нагреть поверхность металла до температуры 900...950 °С (до светлокрасного цвета).
- 5 Нанести на поверхность участка тонкий слой прокаленной буры и, расплавив ее, разогнать факелом пламени.
- 6 Наплавить слой латуни шириной 15...20 мм, высотой 2...3 мм.
- 7 Зачистить поверхность наплавленного валика и оценить его качество.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 С какой целью проводят газовую наплавку?
- 2 Перечислите твердые сплавы, наплавляемые газовым пламенем.
- 3 Как производится наплавка сормайта на сталь?
- 4 Какую функцию выполняют флюсы при газовой наплавке?
- 5 В чем заключается газопорошковая наплавка?

## 8 Лабораторная работа № 8. Лазерная наплавка

**Цель работы:** изучить металлические образцы, полученные лазерной наплавкой и оценить их качество.

**Оборудование и материалы:** образцы с наплавленным материалом; оптический микроскоп.

### 8.1 Общее положение

Лазер – это источник света со свойствами, резко отличающимися от всех других источников (ламп накаливания, люминесцентных ламп, пламени, естественных светил и так далее). Лазерный луч распространяется на большие расстояния и имеет строго прямолинейное направление. Луч движется очень узким пучком с малой степенью расходимости (он достигает луны с фокусировкой в сотни метров). Лазерный луч обладает большой теплотой и может пробивать отверстие в любом материале. Световая интенсивность луча больше, чем интенсивность самых сильных источников света. Название лазер – это аббревиатура английской фразы: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER) усиление света с помощью вынужденного излучения. Все лазерные системы можно разделить на группы в зависимости от типа используемой активной среды. Важнейшими типами лазеров являются:

- твердотельные;
- полупроводниковые;
- жидкостные;
- газовые.

Активная среда представляет собой совокупность атомов, молекул, ионов или кристалл (полупроводниковый лазер), которая под действием света может приобретать усиливающие свойства. Итак, каждый атом обладает дискретным набором энергетических уровней. Электроны атома, находящегося в основном состоянии (состояние с минимальной энергией), при поглощении квантов света переходят на более высокий энергетический уровень – атом возбуждается; при излучении кванта света все происходит наоборот. Причем излучение света, т. е. переход на более низкий энергетический уровень может происходить самопроизвольно (спонтанно) или под действием внешнего излучения (вынужденно). Причем, если кванты спонтанного излучения испускаются в случайных направлениях, то квант вынужденного излучения испускается в том же направлении, что и квант вызвавший это излучение, то есть оба кванта полностью тождественны.

Для того чтобы преобладали переходы, при которых происходит излучение энергии (переходы с верхнего энергетического уровня на нижний), необходимо создать повышенную концентрацию возбужденных атомов или молекул (создать инверсную населенность). Это приведет к усилению падающего на вещество света.

Состояние вещества, в котором создана инверсная населенность энергетических уровней, называется активным, а среда, состоящая из такого вещества, – активной средой. Процесс создания инверсной населенности уровней называется накачкой. И еще одна классификация лазеров производится по способу накачки (оптический, тепловой, химический, электрический и т. д.). Методы накачки зависят от типа лазера (твердотельного, жидкостного, газового, полупроводникового и т. д.). Основная задача процесса накачки может быть рассмотрена на примере трехуровневого лазера (рисунок 8.1).

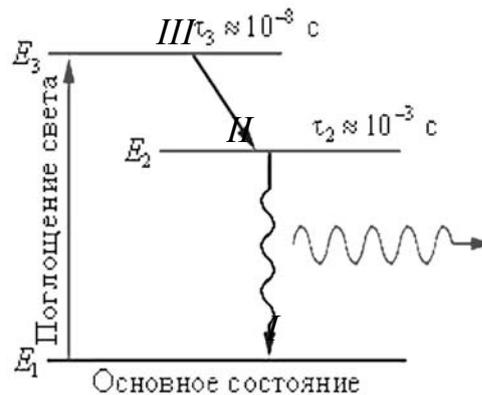


Рисунок 8.1 – Трехуровневая схема

Нижний лазерный уровень I с энергией  $E_1$  является основным уровнем энергии системы, на котором первоначально находятся все активные атомы. Накачка возбуждает атомы и соответственно переводит с основного уровня I на уровень II, с энергией  $E_2$ .

Атомы, оказавшиеся на уровне III, излучают кванты света и переходят на уровень I либо быстро переходят на верхний лазерный уровень II. Чтобы происходило накопление возбужденных атомов на верхнем лазерном уровне II с энергией  $E_2$ , нужно иметь быструю релаксацию атомов с уровня III на II, которая должна превышать скорость распада верхнего лазерного уровня II. Созданная таким образом инверсная населенность обеспечит условия для усиления излучения. Однако, чтобы возникла генерация, необходимо еще обеспечить обратную связь, т. е. чтобы вынужденное излучение, раз возникнув, вызывало новые акты вынужденного излучения. Для создания такого процесса активную среду помещают в оптический резонатор. Оптический резонатор представляет собой систему двух зеркал, между которыми располагается активная среда (рисунок 8.2). Он обеспечивает многократное происхождение световых волн, распространяющихся вдоль его оси по усиливающей среде, вследствие чего достигается высокая мощность излучения.

При достижении определенной мощности излучения выходит через полупрозрачное зеркало. Из-за участия в развитии генерации только той части квантов, которые параллельны оси резонатора, КПД лазеров обычно не превышает 1 %. В некоторых случаях, жертвуя теми или иными характеристиками,

КПД можно довести до 30 %. Существует несколько разновидностей лазеров, которые отличаются друг от друга методом обработки материала.

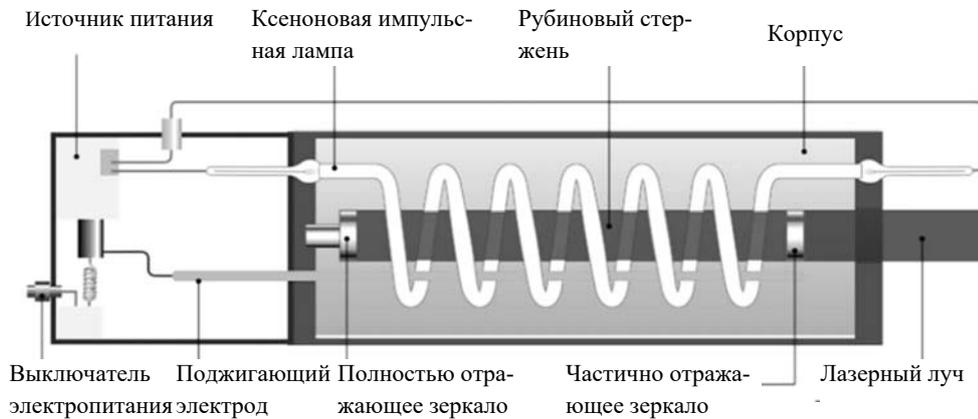


Рисунок 8.2 – Схема лазера

**Твердотельные лазеры.** Существует большое количество твердотельных лазеров, как импульсных, так и непрерывных. Наибольшее распространение среди импульсных получил лазер на рубине и неодимовом стекле (стекле с примесью Nd). Неодимовый стержень длиной 100 см и диаметром 4...5 см способен дать импульс генерации с энергией 1000 Дж за время  $\sim 10...3$  с. Лазер на рубине, наряду с лазером на неодимовом стекле, является наиболее мощным импульсным лазером. Полная энергия импульса генерации достигает сотен Джоулей при длительности импульса 10...3 с.

Трудности выращивания больших монокристаллов или варки больших образцов однородного и прозрачного стекла привели к созданию жидкостных лазеров, в которых примеси атомов редкоземельных элементов вводятся не в кристаллы, а в жидкость.

**Жидкостные лазеры.** Лазер с жидким активным веществом. Преимущество жидкостных лазеров – возможность циркуляции жидкости с целью её охлаждения. Это позволяет получить большие энергии и мощности излучения в импульсном и непрерывном режимах. Жидкостные лазеры, работающие на неорганических активных жидкостях, обладают большими импульсными энергиями при значительной средней мощности. При этом жидкостные лазеры генерируют излучение с узким спектром частот.

Интересными особенностями обладают жидкостные лазеры, работающие на растворах органических красителей. Заменяя красители, можно обеспечить перекрытие всего видимого и части инфракрасного участков спектра. В жидкостных лазерах на красителях в качестве источника накачки обычно используются твердотельные лазеры. Для некоторых красителей можно использовать накачку от специальных импульсных газосветных ламп, дающих более короткие интенсивные вспышки белого света, чем обычные импульсные лампы (менее 50 мкс).

**Газовые лазеры.** Основным достоинством газов как активной среды лазера является высокая оптическая однородность. Поэтому для тех научных и технических применений, для которых прежде всего необходимы максимально высокая направленность и монохроматичность излучения, газовые лазеры представляют наибольший интерес.

Среди лазеров непрерывного действия видимой и ближней инфракрасной областей спектра наибольшее распространение получил гелий-неоновый лазер. Этот лазер представляет собой заключённую в оптический резонатор газоразрядную трубку, заполненную смесью He и Ne. Существенным достоинством является их способность работать в непрерывном режиме. Применение новых методов возбуждения и переход к более высоким давлениям газа могут резко увеличить мощность гелий-неонового лазера.

**Полупроводниковые лазеры.** Среди лазеров видимого и инфракрасного диапазонов полупроводниковые лазеры занимают особое положение по ряду своих характеристик. Полупроводниковые инжекционные лазеры характеризуются очень высоким КПД преобразования электрической энергии в когерентное излучение (близким к 100 %) и могут работать в непрерывном режиме. Другими практически важными особенностями полупроводниковых лазеров являются:

- высокая эффективность преобразования электрической энергии в энергию когерентного излучения (до 30...50 %);
- малая инерционность, обуславливающая широкую полосу частот прямой модуляции (более 10<sup>9</sup> ГГц);
- простота конструкции;
- возможность перестройки длины волны L-излучения и наличие большого числа полупроводников, непрерывно перекрывающих интервал длин волн от 0,32 до 32 мкм.

Общим недостатком всех полупроводниковых лазеров является сравнительно невысокая направленность излучения, связанная с их малыми размерами, и трудность получения высокой монохроматичности. Последнее связано с большой шириной спектра спонтанного излучения на рабочих рекомбинационных переходах. Полупроводниковые лазеры используются с наибольшей эффективностью в тех случаях, когда требования к когерентности и направленности не очень велики, но необходимы малые габариты и высокий КПД. Полупроводниковые лазеры превосходят лазеры всех остальных типов плотностью энергии излучения и величиной КПД. Важным качеством полупроводниковых лазеров является возможность перестройки частоты излучения и управления световым пучком, т. е. модуляция интенсивности света с постоянной времени  $\sim 10 \dots 11$  с.

**Особенности лазерной наплавки.** Лазерная наплавка и сварка, в отличие, к примеру, от электронно-лучевой, также обеспечивающей высокую концентрацию энергии, не требует вакуумных камер. Ее ведут либо на воздухе, либо в аргоне, гелии, либо в CO<sub>2</sub> и др. Лазером можно соединять элементы любых размеров. Лазерное излучение легко передается с помощью оптических систем

в труднодоступные места, может одновременно или последовательно использоваться на нескольких рабочих местах. Оптические системы транспортировки и фокусировки лазерного излучения создают возможность легкого и оперативного управления процессом лазерной сварки и наплавки. В отличие от электронного луча, дуги и плазмы, на лазерный луч не влияют магнитные поля наплавляемых деталей и технологической оснастки, что позволяет получать устойчивое качественное формирование шва по всему контуру. Применение лазера обеспечивает существенное увеличение производительности, по сравнению с дуговыми способами.

Одной из отличительных особенностей лазерной наплавки и сварки является возможность нанесения и соединения трудносвариваемых материалов, в том числе разнородных. Лазерную наплавку рекомендуют к применению, когда необходимо обеспечить следующие требования к изделию:

- получение прецизионной конструкции, размеры которой практически не должны меняться;
- малая зона термического влияния;
- минимальные остаточные напряжения;
- малый слой наплавляемого материала;
- высокая коррозионная стойкость, а также другие требования, которые другими технологиями нанесения поверхностных слоев не выполнимы.

Лазерное излучение на поверхность материала частично отражается, а частично поглощается. Эффективный КПД процесса по физической сущности является эффективным коэффициентом поглощения лазерного излучения.

Значения КПД зависят от параметров режима и условий наплавки, особенно ее скорости. Это связано с влиянием размеров и формы образующегося парогазового канала на поглощение лазерного излучения. Разные состояния поверхностей образцов перед наплавкой незначительно влияют на КПД, потому что кромки нагреваются до  $T_{пл}$ , а коэффициент поглощения лазерного излучения значительно растет с ростом температуры. Высокопроизводительные режимы лазерной сварки и наплавки с большими скоростями ( $V_{св} = 25 \dots 30$  мм/с), значительно превосходящими скорость дуговых способов, обеспечивают максимальную энергетическую эффективность процесса и рекомендуются к применению. Оптимальные значения КПД равны  $0,6 \dots 0,7$  и не уступают соответствующим показателям при дуговых способах наплавки.

Качество наплавленных слоев, выполняемых с помощью лазера, в значительной степени зависит от качества подготовки поверхности, подлежащей наплавке. Поверхность металла следует очищать от окалины, ржавчины, других загрязнений, а также от влаги. Указанные загрязнения и влага создают условия для образования пористости, оксидных включений, а в некоторых случаях и холодных трещин в наплавленном металле и зоне термического влияния за счет насыщения водородом.

### ***Порядок выполнения работы***

- 1 Выполнить шлифование и полирование образца со швом, полученным лазерной наплавкой.
- 2 Провести травление полученного образца в 3-процентном спиртовом растворе азотной кислоты.
- 3 С помощью оптического микроскопа исследовать структуру наплавленного металла и размер зоны термического влияния.
- 4 Провести сравнительный анализ качества металла, наплавленного с помощью лазера и размера ЗТВ по отношению к ранее рассмотренным способам сварки и наплавки.
- 5 Сделать заключение о качестве швов, полученных лазерной наплавкой.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 В чем отличие лазерной наплавки от других способов?
- 2 Какие виды лазеров Вы знаете?
- 3 В чем преимущества твердотельных лазеров?
- 4 В чем особенность полупроводниковых лазеров?
- 5 Что является основным элементом твердотельного лазера?
- 6 Перечислите преимущества лазерной наплавки и сварки?

### **Список литературы**

- 1 Технология конструкционных материалов: учебное пособие / Под ред. А. М. Дальского. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1990. – 352 с.: ил.
- 2 Справочник сварщика / Под ред. В. В. Степанова. – Москва : Машиностроение, 1983. – 560 с.
- 3 Оборудование для дуговой сварки: справочное пособие / Под ред. Н. В. Смирнова. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1986. – 656 с.
- 4 **Браткова, О. Н.** Источники питания сварочной дуги / О. Н. Браткова. – Москва : Высшая школа, 1982. – 117 с.
- 5 Технология конструкционных материалов / Под ред. О. С. Комарова. – Минск : Новое знание, 2005. – 560 с.
- 6 Сварка в машиностроении : справочник в 4 т. / Под ред. Н. А. Ольшанского. – Москва: Машиностроение, 1978. – Т. 1. – 504 с.
- 7 Сварка в машиностроении : справочник в 4 т. / Под ред. А. И. Акулова. – Москва : Машиностроение, 1978 – Т. 1. – 434 с.
- 8 **Куликов, В. П.** Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки : учебное пособие / В. П. Куликов. – Минск: Экоперспектива, 2003. – 415 с.

9 Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки: учебник / Под ред. А. И. Акулова. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Машиностроение, 2003. – 560 с.

10 **Потапьевский, А. Г.** Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Ч. 1: Сварка в активных газах / А. Г. Потапьевский. – 2-е изд., перераб. – Киев: Екотехнологія, 2007. – 192 с.

11 Сварочные материалы для дуговой сварки. Защитные газы и сварочные флюсы / Под ред. Н. Н. Потапова. – Москва: Машиностроение, 1989. – 544 с.

12 **Полевой, Г. В.** Газопламенная обработка металлов / Г. В. Полевой, Г. К. Сухинин. – Москва : Академия, 2010. – 336 с.

13 **Катаев, Р. Ф.** Сварка пластмасс / Р. Ф. Катаев. – Екатеринбург: УГТУ УПИ, 2008. – 138 с.

14 **Волков, С. С.** Сварка и склеивание полимерных материалов: учебное пособие / С. С. Волков – Москва : Химия, 2001. – 376 с.