

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Тольяттинский государственный университет  
Институт машиностроения  
Кафедра «Сварка, обработка металлов давлением  
и родственные процессы»

**В.В. Ельцов**

# ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

**Электронное учебное пособие**



© ФГБОУ ВО «Тольяттинский  
государственный университет», 2019

ISBN 978-5-8259-1277-6

УДК 621.791.7(075.8)

ББК 34.641

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор Волжского университета  
им. В.Н. Татищева *С.В. Краснов*;

д-р техн. наук, профессор кафедры «СОМДиРП» Тольяттинского  
государственного университета *А.И. Ковтунов*.

Ельцов, В.В. Технология сварки плавлением : электронное учебное пособие / В.В. Ельцов. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2019. – 1 оптический диск.

В состав учебного пособия включены четыре модуля, посвящённые характеристикам сварочных материалов, различным способам сварки плавлением и параметрам режима сварки, технике и технологии газовой сварки и резки металлов и сплавов, технологии сварки сталей различного класса легирования, ремонтной сварки чугуна, сварки легких и цветных сплавов. В приложении даны международные термины и определения в области сварки.

Учебное пособие предназначено для помощи студентам в усвоении курса «Технология сварки плавлением», а также для подготовки к итоговому государственному экзамену и вступительным экзаменам в магистратуру по направлению 15.04.01 «Машиностроение».

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8; PIII 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; CD-ROM; Adobe Acrobat Reader.

Редактор *О.И. Елисеева*  
Технический редактор *Н.П. Крюкова*  
Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*  
Художественное оформление,  
компьютерное проектирование: *И.И. Шишкина*

Дата подписания к использованию 17.01.2019.

Объем издания 13,7 Мб.

Комплектация издания:

компакт-диск, первичная упаковка.

Заказ № 1-80-16.

Издательство Тольяттинского государственного университета  
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14  
тел. 8(8482) 53-91-47, [www.tltsu.ru](http://www.tltsu.ru)

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ .....	5
Модуль 1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СВАРОЧНОЙ ТЕХНИКИ.	
СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....	8
Тема 1. История развития и классификация способов сварки плавлением .....	8
Тема 2. Сварочные материалы для производства сварных конструкций .....	14
Модуль 2. СПОСОБЫ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ И ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ МЕТАЛЛОВ .....	34
Тема 3. Ручная дуговая сварка и наплавка .....	34
Тема 4. Автоматическая и механизированная сварка и наплавка под слоем флюса .....	43
Тема 5. Сварка в защитных газах .....	57
Тема 6. Электрошлаковая сварка .....	69
Модуль 3. ГАЗОПЛАМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ .....	81
Тема 7. Газокислородная сварка стали .....	81
Тема 8. Кислородная разделительная резка металлов .....	86
Модуль 4. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВАРКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	90
Тема 9. Технология сварки углеродистой стали .....	90
Тема 10. Основные затруднения при сварке стали различного класса легирования .....	94
Тема 11. Ремонтная сварка и наплавка чугуна .....	109
Тема 12. Сварка и наплавка сплавов на основе алюминия и магния .....	125
Тема 13. Сварка цветных металлов и сплавов .....	157
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	171
ГЛОССАРИЙ .....	173
Приложение .....	180

## ВВЕДЕНИЕ

Сварка как технологический процесс получения неразъемных соединений из различных металлических и неметаллических материалов используется в мировой промышленности уже более 120 лет. За этот период в области сварочного производства произошли колоссальные изменения, касающиеся как технологического процесса сварки, так и оборудования и сварочных материалов, применяемых для реализации технологий. Эти изменения характеризуются количеством созданных видов и способ сварки, применяемых в современном производстве, техническими и технологическими характеристиками сварочного оборудования, номенклатурой и свойствами сварочных материалов, а также отраслями промышленности, в которых применяют сварочные процессы. Основными потребителями металлопродукции в мире в настоящее время являются металлоперерабатывающие отрасли промышленного производства – машиностроение, автомобилестроение и судостроение, в которых наиболее высоки уровень и объемы применения сварки.

Массовое производство сварных конструкций тесно связано с объемами производства основных конструкционных материалов, таких как сталь различных классов легирования, алюминиевые и магниевые сплавы, титан. Большая доля сварных конструкций из этих материалов изготавливается методами сварки плавлением. Широкое распространение технологии сварки плавлением конструкционных материалов вызывает необходимость изучать ее основные проблемы при подготовке специалистов в области сварочного производства.

Советская и российская специальная литература, посвященная исследованию сварки и родственных технологических процессов, весьма богата и разнообразна. Изданы многочисленные справочники, монографии и учебники по различным вопросам сварочной техники, имеется периодическая литература, освещающая новейшие достижения в области сварки. В то же время для подготовки бакалавров соответствующего профиля, не имеющих возможности прочесть и изучить специальные труды по отдельным вопросам сварки, нужны книги, в которых кратко и доступно изложены все основные

виды и способы сварки, их характеристики и особенности, в том числе и при сварке плавлением. Данное учебное пособие отвечает таким требованиям.

Цель данного пособия – обеспечить формирование профессиональных компетенций, предусмотренных федеральным государственным образовательным стандартом для программ подготовки бакалавров по направлению 15.03.01 «Машиностроение», а именно:

- способности разрабатывать технологическую и производственную документацию с использованием современных инструментальных средств;
- умения выбирать основные и вспомогательные материалы и способы реализации основных технологических процессов и применять прогрессивные методы эксплуатации технологического оборудования при изготовлении изделий машиностроения.

Задачи учебного пособия:

- дать информацию о сварочных материалах, защитных средах и особенностях сочетаний основных и присадочных материалов при сварке;
- сформировать навыки анализа техники исполнения сварных швов и способов производства сварных соединений;
- дать представление об особенностях влияния параметров режима сварки на форму и размеры шва при различных способах сварки;
- способствовать формированию компетенции по оценке технологий сварки различных материалов дуговыми способами.

Студенты, приступая к изучению курса «Технология сварки плавлением», уже имеют представление о технологических процессах сварки из курса «Введение в профессию». Они знают конструкционные материалы, из которых изготавливают сварные конструкции, их характеристики и маркировку из курсов «Материаловедение» и «Технология конструкционных материалов». Эти знания можно использовать при назначении сварочных и наплавочных материалов для конкретной технологической операции сварки.

Содержание учебного пособия делится на четыре модуля и включает тринадцать тем для изучения, дополнительным материалом является глоссарий и краткий перечень англо-немецких терминов и определений в области сварки.

Логика распределения материала учебного пособия подчинена дедуктивному методу, т. е. сначала даются общие сведения о материалах, процессах, устройствах, применяемых при сварке и наплавке, а затем рассматривается их применение в технологических процессах сварки различных конструкционных материалов.

## Модуль 1

# ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СВАРОЧНОЙ ТЕХНИКИ. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

## Тема 1. История развития и классификация способов сварки плавлением

### *Учебные вопросы*

1. Исторический экскурс в области развития электродуговой сварки.
2. Классификация способов сварки плавлением.

### **1. Исторический экскурс в области развития электродуговой сварки**

Явление электрической дуги было открыто в 1802 году практически одновременно российским ученым В.В. Петровым и англичанином Г. Деви при исследовании свойств так называемого вольтового столба. Уже тогда была доказана возможность ее применения для расплавления металлов. Практическое применение этого явления было осуществлено в 1881 году русским ученым Николаем Николаевичем Бенардосом. Он изобрел способ дуговой сварки угольным электродом и устройство для сварки косвенной дугой. Для облегчения процесса сварки он сконструировал держатели электродов, причем в местах горения дуги он расположил газовые горелки. Вследствие этого металл в зоне сварки подогревался пламенем горелок, а продукты сгорания газа способствовали защите расплавленного металла. Кроме того, Н.Н. Бенардос изложил принципы механизации процесса сварки и создал первый автомат для сварки угольным электродом. Впоследствии инженер Бенардос стал активно развивать способ контактной точечной сварки. Он установил два угольных электрода торцами напротив друг друга, а между ними поместил свариваемые металлические листы. При пропускании электрического тока через электроды в месте контакта электродов и металла образовывалась сварная точка. Практически одновременно с российским инженером исследованиями в области контактной сварки занимался британский физик Уильям Томсон.



Открытия Н.Н. Бенардоса усовершенствовал его современник — инженер Николай Гаврилович Славянов. Николай Гаврилович отказался от использования аккумуляторной батареи Н.Н. Бенардоса в качестве источника тока, а электрический ток для сварки стал брать от генератора. Он отказался также от угольного электрода и стал применять металлический стержень. Один полюс динамо-машины он соединил с обрабатываемой деталью, а другой — с металлическим стержнем, который вставлялся в специальный сварочный аппарат, так называемый плавильник. Электрическая дуга, которая при пропускании тока возникала между металлическим стержнем и обрабатываемой деталью, плавил металл стержня и детали. Когда электрическая дуга выключалась, металл застывал, и получалось прочное сварное соединение.

Заменяя угольный электрод металлическим, еще в 1891 году Славянов получил привилегии (патенты) № 86 и 87 на способ электрического уплотнения металлических отливок и способ электрической отливки металлов. Н.Г. Славянов не только изобрел дуговую сварку металлическим электродом, описал ее в своих статьях, книгах и запатентовал в различных странах мира, но и сам широко внедрял ее в практику. С помощью обученного им коллектива рабочих-сварщиков Славянов дуговой сваркой исправлял дефекты литья и восстанавливал детали паровых машин и различного крупного оборудования. Инженер Славянов создал первый сварочный генератор и автоматический регулятор длины сварочной дуги, разработал флюсы для повышения качества наплавленного металла при сварке. Николай Гаврилович создал первый в мире автомат для дуговой сварки металлов плавящимся электродом и предложил



Николай Гаврилович Славянов  
(1854–1897)

для повышения качества сварных соединений защищать сварочную ванну шлаком.

Сварочная установка, разработанная Н.Г. Славяновым (рис. 1.1), дает представление о процессе выполнения сварного шва с помощью плавящегося электрода. Деталь 1 и металлический электрод 2 соединены с генератором тока 3. Устройство автоматической регулировки зазора между концами электродов 4 поддерживает непрерывное горение дуги.

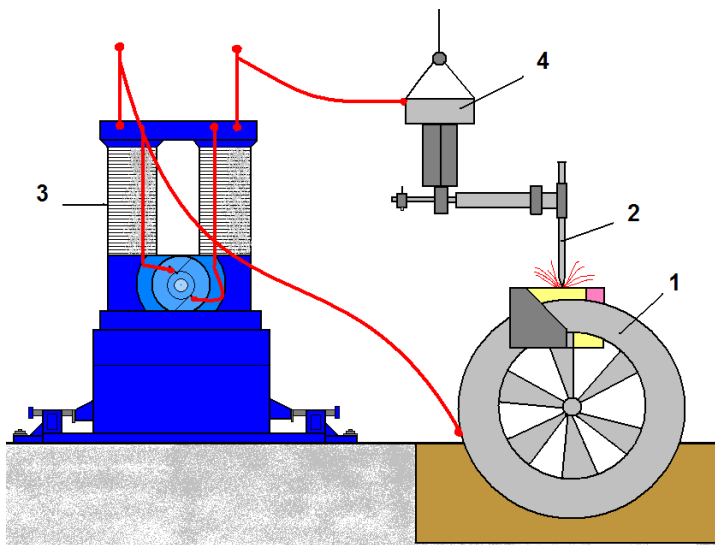


Рис. 1.1. Сварочная установка, разработанная Н.Г. Славяновым

Жизнь Николая Гавриловича Славянова оборвалась внезапно. Зимой 1896 года он, работая на открытом воздухе в электрическом цехе Мотовилихинского завода, сильно простудился и заболел ревматизмом. Это привело к тяжелой болезни сердца. Третьего октября 1897 года он присутствовал при заварке вала паровой машины, а 5 октября в десять часов утра его уже не стало.

Стимулом для дальнейшего развития сварочных технологий было изобретение покрытых электродов. В 1907 году шведский инженер Оскар Кельберг (основатель фирмы ESAB) на основе принципов, изложенных Н.Г. Славяновым, разработал способ стаби-

лизации дугового разряда и защиты зоны сварки от окружающего воздуха специальными веществами, наносимыми на поверхность электродного стержня в виде покрытия. При плавлении таких электродов образовывалась газовая и шлаковая защита сварочной ванны, что резко повысило качество сварных соединений.

Первая мировая война ускорила развитие сварочной техники и технологии. Сварочные процессы начали применяться для ремонта и постройки судов в США, Германии, Франции, Австрии, Швеции. В нашей стране широкое применение сварки началось в начале 20-х годов. В 1924 году на заводе «Электрик» в Ленинграде под руководством инженера В.П. Никитина была спроектирована и изготовлена первая отечественная электросварочная машина постоянного тока и разработана конструкция сварочного трансформатора. С 1935 года крупнейшие зарубежные фирмы начали изготавливать сварочные трансформаторы по схеме В.П. Никитина. В конце 30-х годов советским ученым, академиком Е.О. Патеном и коллективом АН УССР была разработана автоматическая сварка под слоем флюса, а в декабре 1940 года принято постановление правительства о внедрении ее в промышленность. Огромную роль этот процесс сварки сыграл во время Великой Отечественной войны, способствуя ускорению производства танков и другого вооружения.

В конце 40-х годов промышленное применение получают способы дуговой сварки в защитных газах (атомно-водородная, аргонодуговая).

В 1949 году в ИЭС им. Е.О. Патона разработан новый способ сварки плавлением — электрошлаковая сварка. За создание и внедрение этого способа группе ученых во главе с профессором Г.З. Волошкевичем была присуждена Ленинская премия. На этот способ сварки, названный «русским чудом», были куплены лицензии США, Японией и многими другими странами.

Развитие сварочной техники связано с изысканием новых источников тепла. Одним из них является концентрированный поток электронов в вакууме, на основе которого французами был создан новый вид сварки — электронно-лучевая, для соединения тугоплавких, химически активных металлов и сплавов и специальных сталей в вакууме.

Сварка плавлением сегодня – это электрическая дуга в углекислом газе, аргоне, гелии; это струя высокотемпературной плазмы и электронный луч, луч лазера; это камера с контролируемой атмосферой, в которую сварщик входит в скафандре космонавта. Не утратила еще своего значения для различных отраслей промышленности ручная дуговая и газовая сварка. Возможности технологического процесса сварки очень широки: сваривают оболочки для радиоактивных изотопов из высоколегированных сталей толщиной 0,1 мм, детали пресса толщиной 3400 мм, двухслойные стали, различные сплавы между собой, металлы с неметаллами, проводят сварку в космосе и под водой. Сварка широко используется в медицине: сваривают и режут кости, зубные протезы, сетчатку глаз и иные биологические ткани. Без сварки не обходится металлургия: для получения особо чистого металла применяют электрошлаковый и электронно-лучевой переплав.

## **2. Классификация способов сварки плавлением**

Различают семь видов сварки плавлением.

### *1. Электродуговая сварка:*

- по виду электрода:
  - плавящимся электродом;
  - неплавящимся электродом;
- по виду дуги:
  - свободной дугой;
  - сжатой дугой;
- по характеру воздействия дуги на основной металл:
  - дугой прямого действия;
  - дугой косвенного действия;
  - трехфазной дугой;
- по роду сварочного тока:
  - постоянным током;
  - переменным током;
  - пульсирующим током;
- по наличию внешнего воздействия на формирование шва:
  - со свободным формированием шва;
  - с принудительным формированием шва;

- по полярности сварного тока:
  - током прямой полярности (минус на электроде);
  - током обратной полярности (плюс на электроде);
    - по количеству дуг с отдельным питанием током:
      - однодуговая;
      - двухдуговая;
      - многодуговая;
        - по количеству электродов с общим подводом тока:
          - одноэлектродная;
          - двухэлектродная;
          - многоэлектродная;
            - по наличию и направлению колебаний электрода относительно оси шва:
              - без колебаний;
              - с поперечными колебаниями;
              - с продольными колебаниями;
              - со сложными колебаниями;
                - по роду защиты зоны сварки от окружающего воздуха:
                  - без защиты (голым электродом со стабилизирующим покрытием);
                  - со шлаковой защитой (толстопокрытыми электродами, под флюсом);
                  - с газовой защитой (в среде газов);
                  - со шлако-газовой защитой (толстопокрытыми электродами);
                  - с комбинированной защитой (газовая среда и покрытие или флюс);
                    - по степени механизации:
                      - ручная сварка;
                      - механизированная;
                      - автоматическая.

## 2. Электрошлаковая сварка (сопротивлением):

- по виду электрода:
  - с проволочным электродом;
  - пластинчатым электродом;
  - плавящимся мундштуком;
    - по наличию колебаний электрода:
      - без колебаний;
      - с колебаниями;

- по условиям наблюдения за процессом горения дуги:
  - открытая;
  - закрытая;
  - полуоткрытая.

3. *Световая сварка — по виду источника света:*

- солнечная (гелиосварка);
- лазерная.

4. *Газовая сварка:*

- ацетиленокислородная;
- пропаноокислородная.

5. *Электронно-лучевая сварка — по направлению колебаний электронного луча:*

- с продольными колебаниями;
- поперечными;
- вертикальными;
- со сложными колебаниями.

6. *Термитная сварка.*

7. *Литейная сварка.*

## **Тема 2. Сварочные материалы для производства сварных конструкций**

### *Учебные вопросы*

1. Неплавящиеся электродные стержни.
2. Цельнометаллические сварочные проволоки.
3. Порошковые проволоки.
4. Качественные электроды.
5. Флюсы для сварки.
6. Защитные газы.

### **1. Неплавящиеся электродные стержни**

Неплавящиеся электроды (НЭ) изготавливают из чистого вольфрама, вольфрама с активирующими присадками из окислов тория, иттрия, лантана. Кроме того, неплавящиеся электроды изготавливают из угля и синтетического графита. Широкое использование вольфрамовых стержней с активирующими присадками обусловлено их

тугоплавкостью ( $T_{пл} = 4500 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и высокой электро- и теплопроводностью. Активирующие присадки имеют более низкий потенциал ионизации, чем чистый вольфрам, а это способствует снижению работы выхода электронов с торца электрода при горении дуги. В свою очередь, снижение падения напряжения в приэлектродной области уменьшает количество теплоты, выделяемой в ней при протекании тока, а значит, увеличивается температурная стойкость электрода. Кроме того, добавки к вольфрамовым электродам окислов лантана, тория или иттрия облегчают зажигание дуги, увеличивают устойчивость дугового разряда.

Вольфрамовые электроды предназначены для электродуговой сварки в среде инертных газов, для плазменной сварки и резки и для плазменного напыления. Вольфрамовые электроды маркируются буквами и цифрами:

ЭВЧ – электрод вольфрамовый чистый;

ЭВЛ-20 – электрод вольфрамовый лантанированный;

ЭВТ-15 – электрод вольфрамовый торированный;

ЭВИ-30 – электрод вольфрамовый иттрированный.

Цифры указывают на содержание окислов лантана, тория и иттрия в десятых долях процента.

Изготавливают вольфрамовые электроды диаметром от 0,2 до 12 мм, причем диаметром 0,5...2,5 мм изготавливают протяжкой, остальные – ковкой. Электроды марки ЭВЧ применяют достаточно редко вследствие их низкой стойкости. Активированные вольфрамовые электроды применяют для сварки как на переменном, так и на постоянном токе. Вольфрамовые электроды применяют для сварки черных, цветных и легких сплавов. Черные и цветные сплавы сваривают, как правило, на постоянном токе прямой полярности, легкие сплавы – на переменном токе. Для снижения расхода материала электрода при сварке имеет значение форма заточки его торца. Для сварки на постоянном токе затачивают электрод под острый конус, для сварки на переменном токе – под полусферу. Также с целью снижения расхода электрода необходимо в течение нескольких секунд после сварки обеспечивать его защиту инертным газом.

Графитовые и угольные электроды отличаются малой теплопроводностью. Они имеют круглое сечение диаметром 5...25 мм и длину

200...300 мм. С помощью таких электродов можно сваривать и на постоянном, и на переменном токе, но лишь только черные сплавы. Недостатком сварки такими электродными стержнями является их интенсивное выгорание и попадание углерода в сварной шов. Кроме того, при сварке электродом большого сечения наблюдается «блуждание дуги» по торцу электрода. С целью стабилизации положения дуги применяют угольные электроды с фитилем, т. е. каналом, расположенным по центру электрода и заполненным порошковой массой с более низким потенциалом ионизации, чем у графита или угля. Поэтому несмотря на низкую стоимость графитовые и угольные электроды не нашли широкого распространения в сварочных процессах.

## **2. Цельнометаллические сварочные проволоки**

При дуговой сварке под флюсом, в защитных газах, а также при электрошлаковой сварке применяют сварочную проволоку без покрытия. Поверхность сварочной проволоки должна быть чистой и гладкой, без окалины, ржавчины, масла и др. загрязнений. По виду поверхности проволоки подразделяются на омедненные и неомедненные. Омеднение снижает коррозию проволоки и улучшает электрический контакт ее с токоподводящим устройством. Сварочные проволоки получают либо горячей прокаткой, либо волочением. На сварочную проволоку разработан стандарт, ГОСТ 2246-70 «Проволока стальная сварочная». Имеется также стандарт на наплавочную проволоку – ГОСТ 10543-75 «Проволока стальная наплавочная» – и стандарт на проволоку для сварки алюминиевых сплавов – ГОСТ 7871-75 «Проволока сварочная из алюминия и алюминиевых сплавов». В обозначении стальной проволоки по стандарту указывается ее назначение «Св», т. е. сварочная проволока, затем содержание углерода в сотых долях процента, затем примерное содержание легирующих элементов. Если после цифры указана буква «А», то это говорит о степени чистоты проволоки. Например:

Св-08 – сварочная проволока с содержанием углерода около 0,08 %, примесей серы и фосфора не более: S – 0,04 %; P – 0,04 %;

Св-08А ..... S – 0,03 %; P – 0,03 %;

Св-08АА ..... S – 0,02 %; P – 0,02 %;



Св-10Г2 – углерода около 0,1 %, марганца около 2 %;

Св-08Г2С – углерода 0,08 %; Мп – 2 %; Si – до 1 %;

Св-06Х19Н9Т – углерод около 0,06 %; Cr – 18...20 %; Ni – 8...10 %; Ti – до 1 %; Мп – 1...2 %; Si – 0,4...1 %.

Стальные проволоки для наплавки обозначаются буквами (НП), например проволока ЗНП-105Х ГОСТ 10543-75. Первая цифра указывает на диаметр проволоки в миллиметрах – 3 мм. Далее – наплавочная проволока с содержанием углерода около 1,05 %; хрома около 1 %. Основное отличие стальной сварочной проволоки от наплавочной проволоки состоит в содержании в них углерода. В сварочной проволоке предельное содержание углерода составляет 0,18 %, тогда как в наплавочной проволоке его содержание может быть более 1 %.

Сварочные проволоки из алюминия и алюминиевых сплавов обозначаются: от СвА97 до СвА5 (сварочные проволоки из алюминия, где Al от 99,97 % до 99,5 %), СвАМг6 (сварочная проволока из сплава алюминия с магнием 6 %), СвАК5 (сварочная проволока из сплава алюминия с кремнием 5 %).

### **3. Порошковые проволоки**

Порошковые проволоки представляют собой трубчатую сложного внутреннего сечения проволоку, заполненную порошкообразным наполнителем. Наполнитель имеет состав, соответствующий покрытиям электродов основного типа. Масса порошкообразного наполнителя составляет от 15 до 40 % массы проволоки.

Порошок, входящий в состав порошковой проволоки, при ее расплавлении электрической дугой выполняет следующие функции:

- обеспечивает газовую и шлаковую защиту сварочной ванны от воздействия окружающей среды;
- способствует раскислению сварочной ванны;
- легирует сварной шов;
- стабилизирует дуговой разряд;
- рафинирует сварной шов.

Порошковая проволока пригодна для сварки сталей любого класса легирования и для наплавки слоев с особыми свойствами. Порошковую проволоку изготавливают из стальной ленты (рис. 1.2).

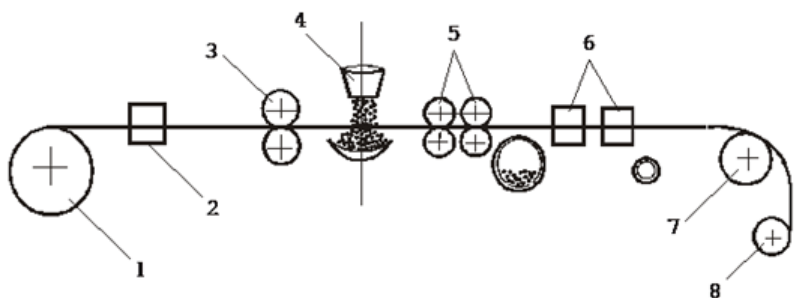


Рис. 1.2. Схема процесса изготовления порошковой проволоки:  
 1 – рулон стальной ленты; 2 – очистное устройство; 3 – ролики жёлоба;  
 4 – дозатор; 5 – ролики формирования сечения проволоки; 6 – фильеры  
 диаметра; 7 – волочильный барабан; 8 – кассета

Маркировка порошковой проволоки для сварки малоуглеродистой и низколегированной стали осуществляется буквами ПП (порошковая проволока), АН (академии наук), цифры 1, 3, 7, 8 (номер серии разработки). Например: ПП-АН1, ПП-АН3 – порошковые проволоки для сварки низкоуглеродистой стали в нижнем положении; ПП-АН7 – для сварки в любом пространственном положении. Пространственное положение сварки определяется составом порошкового наполнителя. Чем более тугоплавкий наполнитель, тем хуже жидкотекучесть шлаков, образующихся при сварке, а соответственно, лучше защита шва. Проволока ПП-АН7 в составе порошка имеет достаточно много тугоплавкого компонента – рутила, поэтому ее можно использовать для сварки в любом пространственном положении.

Порошковые проволоки для сварки легированной стали также маркируются буквами ПП, а кроме того, буквами и цифрами, обозначающими степень легирования стали. Например: ПП-1Х14Т, ПП-25Х5ФМС – порошковые проволоки для сварки легированной стали, соответственно 1Х14Т и 25Х5ФМС.

По способу защиты порошковые проволоки делятся на самозащитные и используемые с дополнительной защитой газом ( $\text{CO}_2$ ) или флюсом. Самозащитные проволоки, как правило, применяются и для производства сварных конструкций, и для наплавки деталей. Порошковые проволоки, используемые с дополнительной защитой, применяются в основном для наплавочных работ.

По составу наполнителя порошковые проволоки делятся на 5 типов:

- 1) рутил-органические;
- 2) карбонатно-флюоритные;
- 3) рутиловые;
- 4) рутил-флюоритные;
- 5) флюоритные.

Состав: рутиловый концентрат или титановая руда ( $\text{TiO}_2$ ), алюмосиликаты, карбонаты (мел, мрамор), окислы щелочноземельных металлов, органические соединения (крахмал, целлюлоза).

#### **4. Качественные электроды**

Электроды для ручной дуговой сварки представляют собой стальные стержни длиной до 450 мм, изготовленные из сварочной проволоки, на поверхность которых нанесено покрытие различной толщины. Один конец (20...30 мм) освобождается от покрытия для электрического контакта с электрододержателем. Покрытие предназначено для повышения устойчивости горения дуги, образования комбинированной газошлаковой защиты, легирования, рафинирования и раскисления металла сварного шва.

Для изготовления покрытий применяют следующие компоненты:

- 1) газообразующие – органические вещества (крахмал, целлюлоза, мука, декстрин), неорганические вещества (мрамор, магнезит,  $\text{CaCO}_2$ ,  $\text{MgCO}_3$ );
- 2) легирующие элементы и элементы-раскислители (кремний, марганец, титан) обычно в виде их сплавов с железом, а алюминий – в виде порошка;
- 3) ионизирующие или стабилизирующие, т. е. элементы с низким потенциалом ионизации, в основном это соединения калия, натрия, кальция (мел, полевой шпат, гранит);
- 4) шлакообразующие – основа покрытия. Обычно это руды металлов (марганцевая, титановая), минералы (кремнезём, полевой шпат, мрамор, плавиковый шпат);
- 5) связующие – водные растворы силикатов натрия и калия, т. е. «жидкое стекло»;
- 6) формовочные добавки – вещества, придающие обмазочной массе лучшие пластические свойства (каолин, слюда, бентонит, декстрин).

Для повышения производительности сварки в покрытие электрода добавляют железный порошок до 60 % от массы покрытия.

Все указанные компоненты предназначены для выполнения требований, предъявляемых к сварочным электродам.

Для всех типов электродов применимы следующие *общие* требования:

- обеспечение устойчивого горения дуги;
- формирование шва, свободного от дефектов;
- получение металла шва определенного химического состава и свойств;
- спокойное и равномерное плавление электродного стержня и покрытия в процессе сварки;
- минимальные потери электродного металла от угара и разбрызгивания;
- высокая производительность сварки;
- легкая отделимость шлаковой корки с поверхности шва;
- достаточная прочность покрытия;
- сохранение физико-химических и технологических свойств с течением времени;
- минимальная токсичность газов, выделяемых при плавлении покрытий.

К электродам предъявляют ряд *специальных* требований:

- получение шва заданной формы (вогнутая поверхность шва, глубокий провар);
- возможность сварки в различных пространственных положениях;
- возможность сварки определенным способом (сварка опиранием, лежачим электродом, сварка вертикальных швов сверху вниз);
- получение металла шва со специальными свойствами (поверхностная прочность, износостойкость, коррозионная стойкость и т. д.).

#### ***Технологические характеристики покрытых электродов***

К технологическим характеристикам покрытых электродов относятся:

1) коэффициент расплавления

$$\alpha_p = \frac{G_p}{I \cdot t}, \text{ г/(А} \cdot \text{ч)},$$

где  $G_p$  – масса расплавленного металла электрода, г;  $t$  – время горения дуги, ч;  $I$  – сила сварочного тока, А.

Для электродов, содержащих в обмазке железный порошок,

$$G_p = G_{\text{ст. эл}} + G_{\text{доп. мат}};$$

2) коэффициент наплавки

$$\alpha_p = \frac{G_n}{I \cdot t}, \text{ г}/(\text{А} \cdot \text{ч}),$$

где  $G_n$  – масса наплавленного металла;

3) коэффициент потерь на угар и разбрызгивание

$$\varphi = (G_p - G_n) \cdot 100 \%;$$

4) коэффициент массы покрытия

$$K = G_n / G_m,$$

где  $G_n$  – масса покрытия на электроде;  $G_m$  – масса металла стержня на длине обмазанной части электрода.

Все эти коэффициенты определяются экспериментальным путем.

### ***Классификация электродов***

Электроды для ручной дуговой сварки классифицируют по следующим основным признакам:

- по назначению;
- по типу;
- по механическим свойствам металла шва;
- по толщине покрытия, нанесенного на стержень;
- по видам покрытия;
- по допустимым пространственным положениям сварки;
- по способу нанесения покрытия.

Электроды для сварки и наплавки в зависимости от назначения подразделяются на ряд классов (ГОСТ 9466-75):

- для сварки углеродистых и низколегированных сталей (У);
- для сварки легированных сталей (Л);
- для сварки легированных теплоустойчивых сталей (Т);
- для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами (В);
- для наплавки поверхностей с особыми свойствами (Н).

В зависимости от состава ГОСТ 9466-75 устанавливает следующие виды покрытий электродов для сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей:

- с кислым покрытием (А);
- с основным покрытием (Б);
- с целлюлозным покрытием (Ц);
- с рутиловым покрытием (Р);
- прочие покрытия (П).

Условное обозначение покрытых электродов имеет свою структуру (рис. 1.4).

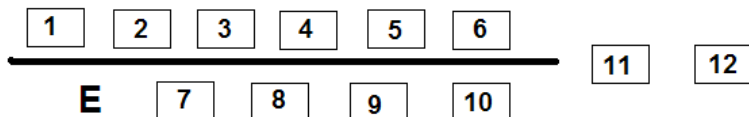


Рис. 1.4. Структура условного обозначения покрытых электродов

Здесь: 1 – тип электрода; 2 – марка электрода; 3 – диаметр, мм; 4 – назначение; 5 – обозначение толщины покрытия; 6 – группа электродов по ГОСТ; 7 – группа индексов, указывающих характеристики наплавленного металла и металла шва; 8 – обозначение вида покрытия; 9 – обозначение допустимых пространственных положений сварки или наплавки; 10 – обозначение рода применяемого тока, полярности постоянного тока или напряжения холостого хода источника питания; 11 – обозначение стандарта ГОСТ 9466-75; 12 – обозначение стандарта на типы электродов ГОСТ 9467-75.

Например:

$\frac{\text{Э46А} - \text{УОНИИ} - 13/45 - 3,0 - \text{УД2}}{\text{Е} - 432 (5) \text{ Б} 10}$  ГОСТ 9466-75, ГОСТ 9467-75

Читается: электроды типа Э46А по ГОСТ 9467-75, марки УОНИИ 13/45, диаметром 3 мм, для сварки углеродистых сталей (У), с толстым покрытием (Д), 2-й группы с установленной по ГОСТ 9467-75 группой индексов, указывающих характеристики наплавленного металла, с основным покрытием (Б) для сварки во всех пространственных положениях (1) на постоянном токе обратной полярности (0).

Во всех видах технической документации условное обозначение электродов должно состоять из марки, диаметра, группы электродов и обозначения стандарта ГОСТ 9466-75. Например: электроды УОНИИ 13/45 – 3,0 – 2 – ГОСТ 9466-75.

Для сварки конструкционных сталей тип электрода содержит букву Э, вслед за которой цифрами указана величина временного сопротивления при разрыве кг/мм<sup>2</sup>. Например: Э42, Э50, Э150.

Буква А, расположенная вслед за цифрами, характеризует более высокие характеристики пластичности наплавленного металла. Например: Э46А.

Группа индексов, указывающая характеристики наплавленного металла, включает следующие величины (в знаменателе условного обозначения): первые два индекса указывают минимальное значение  $\sigma_b$ , третий индекс одновременно характеризует минимальные значения ( $\delta_5$ ) ударной вязкости и температуры, при которой она определялась.

Например: Е-432, здесь группа индексов означает, что минимальное сопротивление разрыву равно 430 Н/м<sup>2</sup>, а цифра 2 говорит о том, что  $\delta = 22\%$ , при температуре  $T = 0^\circ\text{C}$ .

Типы электродов для сварки теплоустойчивых сталей в своем обозначении содержат еще характеристики химического состава наплавленного металла. Например: Э-05Х2М, Э-09Х2М1, Э-ХМФ и т. д.

### *Покрyтия электродов*

Органические соединения: мука, крахмал, целлюлоза — дают в основном только газовую защиту. В качестве шлакообразующих добавок используют рутил, титановый концентрат, марганцевую руду, алюмосиликаты (гранит), карбонаты (мрамор). Газовая защита обеспечивается за счет разложения органических составляющих и в результате образования углекислого газа при диссоциации мрамора.

При плавлении кислых покрытий (А) большая часть введенных в них ферросплавов окисляется рудами металлов. Легирование металла шва кремнием и марганцем идет по схеме кремнемарганцево-восстановительного процесса. Кислое покрытие не позволяет легировать металл сварного шва элементами с большим сродством к кислороду. Образующиеся в результате плавления покрытия шлаки кислые, не содержат СаО и не очищают металл от фосфора и серы. В наплавленном металле много растворенного кислорода и неметаллических включений. В результате швы обладают низкими прочностными характеристиками и склонностью к образованию го-

рячих трещин. Электродами с кислым покрытием не рекомендуют сваривать ответственные изделия.

Основу рутиловых покрытий (Р) составляет шлакообразующий компонент – рутиловый концентрат ( $TiO_2$ ), а также алюмосиликаты и карбонаты. Ферромарганца в покрытии <10 %. Газовая защита обеспечивается введением органических соединений. Покрытия этого вида обеспечивают высокое качество металла шва, они малотоксичны и обладают хорошими сварочно-технологическими свойствами.

Покрытия основного типа (Б) в качестве основы содержат карбонаты (мел, мрамор) и плавиковый шпат. Газовая защита обеспечивается разложением карбонатов. Металл раскисляется марганцем (Mn), кремнием (Si) и титаном (Ti), вводимыми в покрытие в виде ферросплавов, или алюминием – в виде порошка.

Эти покрытия слабо окислительные, поэтому позволяют легировать металл шва элементами с большим сродством к кислороду. Наличие большого количества соединений кальция (Ca), хорошо связывающих серу (S) и фосфор (P), обеспечивает высокую чистоту наплавленного металла, а легирование марганцем (Mn) и кремнием (Si) – высокую прочность.

На базе покрытий основного типа (Б) составляют композиции покрытий электродов для сварки ответственных конструкций из низколегированных и углеродистых сталей и всех электродов для сварки высоколегированных сталей.

Электродные стержни, на которые нанесено покрытие слоем 0,8...1,5 мм на сторону, относят к виду толстопокрытых (Д). Коэффициент К массы покрытия таких электродов составляет 0,3–0,45; а для тонкого типа (М)  $K = 0,1$ .

В состав покрытия металлических стержней для сварки меди, ее сплавов и чугуна могут входить такие же компоненты, как и в покрытия для сварки сталей. Основу покрытия металлических стержней для сварки алюминия составляют галоидные соли щелочных и щелочноземельных металлов и криолит. При изготовлении электродов для сварки меди, алюминия и чугуна покрытие наносят методом окунания.



Таблица 1.1

## Марки электродов в зависимости от вида покрытия

| Вид покрытия электродов         | Марки электродов   |
|---------------------------------|--|
| 1. Рудно-кислое покрытие        | ОМИ-5, ЦМ-7, ЦМ-8  |
| 2. Рутитовое                    | АНО-4, АНО-3, МР-3, МР-1, ОЗС-4, ЦМ-9, РБУ-4, ОЗС-12, АНО-12 |
| 3. Фтористо-кальциевое покрытие | УОНИИ 13/45, АНО-7, СМ-11                                    |
| 4. Органическое покрытие        | ВСЦ-4, ВСЦ-4А  |

***Специальные электроды***

Покрытие электродов для сварки с глубоким проваром содержит значительное количество оксидов титана и карбоната железа. Его наносят на стержень слоем большой толщины. Для электродов с глубоким проваром характерна большая втулочка из нерасплавившегося покрытия на конце электрода. При плавлении электрода происходит разложение органических составляющих покрытия с образованием большого количества газов. Тепловая энергия дуги и мощный газовый поток, сконцентрированные втулкой из нерасплавившегося покрытия на торце электрода, обеспечивают глубокое проплавление металла.

Характерной особенностью высокопроизводительных электродов является высокое содержание железного порошка в покрытии (40...60 %) и большая толщина покрытия (коэффициент массы покрытия составляет 1,2...1,8). Высокая производительность при сварке такими электродами достигается за счет дополнительного металла, содержащегося в покрытии, а также от снижения потерь металла на разбрызгивание при сварке на предельно допустимых токах. Марки высокопроизводительных электродов — АНО-1, АНО-10. Плавление высокопроизводительных электродов сопровождается образованием на торце электрода глубокой втулки из нерасплавившегося электродного покрытия. Втулка экранирует столб дуги, увеличивает его длину и степень концентрации тепловой энергии, что увеличивает скорость плавления электрода и глубину проплавления металла.

Ручную дуговую сварку вертикальных швов выполняют обычно способом снизу вверх. Это связано с тем, что при сварке сверху вниз жидкий шлак и расплавленный электродный металл попадают в сварочный зазор, препятствуя сплавлению кромок. При этом силу тока устанавливают на 15...20 % меньше номинальной для данного диаметра электрода, что вызвано необходимостью ограничения объема и жидкотекучести сварочной ванны. Такие параметры процесса снижают производительность сварки.

Для повышения производительности сварки вертикальных швов используют специальные электроды *для сварки способом сверху вниз*. При этом необходимо обеспечить такие физико-химические свойства шлака и металла, которые способствовали бы малой жидкотекучести сварочной ванны, хорошему формированию металла шва и получению необходимого провара. Для этого в состав покрытия электродов вводят большое количество тугоплавкого шлакообразующего компонента – рутила. В состав электродного стержня вводят тугоплавкие элементы-модификаторы, ускоряющие процесс кристаллизации сварочной ванны. К этой группе относятся электроды марки АНО-9. Они рекомендуются специально для высокопроизводительной сварки способом сверху вниз угловых, нахлесточных и стыковых швов, находящихся на вертикальной плоскости.

Кроме перечисленных электродов существуют специальные электроды для сварки «лежащим электродом» и для сварки «наклонным электродом». Они отличаются от обычных электродов своей длиной (до 2 метров), толщиной покрытия (до 2 мм на сторону) и диаметром (до 8 мм).

### ***Технология изготовления покрытых электродов***

#### ***1. Подготовка сварочной проволоки.***

Проволока, поступающая в мотках, подлежит размотке, правке, рубке и очистке. Правка и рубка производятся на правильно-рубильных (отрезных) станках различного типа (ПОС-1, ПОС-20СЗ-МД) с летучими и гильотинными ножами. В процессе рубки контролируются длина стержней и характер среза (перпендикулярность, наличие заусенцев). Электродные стержни очищают от ржавчины, масла и других загрязнений путем пескоструйной обработки кварцевым песком, смешанным с древесными опилками, или травлением.

## *2. Подготовка шихты для обмазки.*

Мойка кусковых материалов (плавикового шпата, гранита) производится в специальных моечных камерах или на специальных решетках струей воды. Сушка сыпучих и кусковых материалов (гематита, титанового концентрата, ильменита, мела, каолина, марганцевой руды) производится в открытых подовых или сушильных печах. Время сушки 2...3 часа, температура 180...200 °С, толщина слоя материала не более 40 мм, процесс предусматривает 2–3 перемешивания.

Для снижения содержания серы и удаления влаги назначается обжиг компонентов при температуре 800...1000 °С в течение 1...1,5 часа.

Для облегчения обработки ферросплавов (феррохрома, ферромolibдена, ферротитана, ферровольфрама) применяется их закалка с нагревом до температуры 950...1000 °С в течение 1...1,5 часа с последующим охлаждением в проточной воде.

Крупное и среднее дробление кусковых материалов (мрамора, плавикового шпата, кварца, доломита, ферросилиция, ферромарганца) производится на молотковых, щековых или вальцевых дробилках. Тонкое измельчение производится в шаровых (цилиндрических или конических) мельницах непрерывного или периодического действия. Процесс просеивания производится на латунных ситах с размером сетки 900...6000 отв/см<sup>2</sup>.

При изготовлении обмазочной массы в ней часто наблюдается газообразование с последующим ее окаменением (скисанием). Это явление – результат соединения жидкого стекла с ферросплавами (ферромарганцем, ферросилицием). Для устранения газообразования размолотые ферросплавы подвергаются процессу пассивирования – созданию на крупинках размолотых ферросплавов защитных (пассивных) окисных пленок. Пассивирование производится сухим и мокрым способами. При сухом пассивировании ферросплавы нагреваются в прокалочных печах до температуры 300...800 °С в течение 1...1,5 часа. Мокрое пассивирование производится на противнях замачиванием размолотых компонентов в чистой воде в течение суток или в водном растворе 0,25...0,50%-процентного марганцовокислого калия в течение 60...90 мин. Сухая шихта составляется по рецептуре и перемешивается в смесителях. В зависимости от способа нанесения покрытия замес может быть разной консистенции: типа оконной замазки (для прессовки) или густой сметаны (для окунания).

3. *Нанесение покрытия на стержни* производится:

- а) вручную (окунанием) поштучно или рамочным способом (до 20–30 стержней одновременно). Толщина покрытия определяется скоростью извлечения электродов из ванны;
- б) опрессовкой на специальных электрообмазочных прессах: ОСЗ-3, АОЭ-1. Производительность прессов 300–500 штук в минуту.

Прокалка электродов производится в специальных конвейерных печах. После прокалки электроды контролируют, упаковывают во влагостойкую парафинированную или битумную бумагу или пленку в пачки по 3–8 кг. На пачку наклеивают паспорт электрода.

### **5. Флюсы для сварки**

Сварочными флюсами называют специально приготовленные неметаллические гранулированные порошки с размером отдельных зерен 0,25...4 мм. Флюсы, расплавляясь, создают газовый и шлаковый купол над зоной сварочной дуги, а после химико-металлургического воздействия в дуговом пространстве и сварочной ванне образуют на поверхности шва шлаковую корку, в которую выводятся различные вредные примеси, окислы, соединения серы, фосфора. Сварочные флюсы в общем случае выполняют те же самые функции, что и порошки в составе порошковой проволоки, и покрытия электродов.

#### ***Классификация флюсов***

По назначению различают флюсы для сварки углеродистых сталей, легированных сталей, цветных металлов, электрошлаковой сварки.

*По содержанию кремния флюсы делятся:*

- 1) на высококремнистые ( $\text{SiO}_2 \sim 45...50 \%$ );
- 2) низкокремнистые ( $\text{SiO}_2 \sim 30...35 \%$ );
- 3) бескремнистые ( $\text{SiO}_2 < 4 \%$ ).

*По содержанию марганца флюсы бывают:*

- 1) марганцевые ( $\text{Mn} > 1 \%$ );
- 2) безмарганцевые ( $\text{Mn} < 1 \%$ ).

*По способу изготовления* – плавленные и неплавленные (керамические).

Плавленные флюсы *по строению частиц* бывают:

- 1) стекловидные;
- 2) пемзовидные.

*По характеру изменения вязкости* различают:

- 1) короткие флюсы, вязкость которых резко повышается при остывании в небольшом интервале температур  $T = 1100 \dots 1050 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;
- 2) длинные флюсы, вязкость которых увеличивается постепенно с понижением температуры в данном ее интервале.

*По химическому составу* флюсы делятся:

- 1) на оксидные, состоящие из окислов металлов;
- 2) солевые, состоящие из фторидов, хлоридов и элементов, не содержащих кислород;
- 3) оксидно-солевые, состоящие из фторидов и окислов металлов.

В свою очередь оксидные флюсы делятся:

- 1) на кислые, содержащие  $\text{SiO}_2$  и  $\text{TiO}_2$ ;
- 2) основные, содержащие  $\text{MgO}$  и  $\text{CaO}$ .

*По размерам зерен* разграничивают:

- 1) обычные флюсы – размер зерен до 3 мм;
- 2) мелкие – размер зерен до 1,6 мм.

### ***Флюсы для сварки углеродистой конструкционной стали***

Полный перечень сварочных плавяных флюсов приводится в государственных стандартах:

- ГОСТ 9087–69 включает 10 марок плавяных флюсов;
- ГОСТ 9087–81 включает 24 марки плавяных флюсов;
- ГОСТ P52222–2004 включает 53 марки плавяных флюсов.

Флюсы АН-348А, ОСЦ-45, ОСЦ-45М, АН-348АМ, АН-60 применяются для сварки малоуглеродистой и низколегированной стали;

ФЦ-9 – для сварки легированной стали;

АН-22, АН-26 – для сварки высоколегированной стали;

АН-8 – для электрошлаковой сварки.

Примерный состав флюса АН-348А:

$\text{SiO}_2$  – 41...44 %;

$\text{MnO}$  – 34...38 %;

$\text{CaO}$  – 6,5 %;

MgO – 5...7 %;  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 4,5 %;  
CaF<sub>2</sub> – 4...5,5 %;  
Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 2 %;  
S – до 0,15 %;  
P – до 0,12 %.

При сварке малоуглеродистой стали под слоем флюса АН-348А проволокой Св-08 в сварочной ванне будут происходить реакции замещения, которые позволяют легировать сварной шов марганцем и кремнием:



Легирование металла марганцем и кремнием повышает стойкость сварного шва против трещин и пор, а также увеличивает прочность сварного соединения.

Для легирования наплавленного металла также применяются *керамические флюсы*. Отсутствие операции плавления при их изготовлении позволяет вводить в состав флюсов минералы, руды, ферросплавы независимо от их взаимной растворимости.

Для сварки низколегированной стали большое распространение получили керамические флюсы К-11, КВС-19.

В состав флюса К-11 входят:

- марганцевая руда – 50 %;
- кварцевый песок – 20 %;
- плавиковый шпат – 10 %;
- ферросилиций – 20 %;
- жидкое стекло – 15 % от всей сухой массы.

Керамические флюсы обладают хорошими сварочно-технологическими свойствами, но они чувствительны к колебаниям режима сварки. Флюсы непрочные, быстро разрушаются, выгорают легирующие элементы. Они дороже плавящихся флюсов, поэтому чаще всего применяются для сварки высоколегированной стали и для наплавки слоя с особыми свойствами.

При разработке технологии сварки под слоем флюса выбирают систему «проволока – флюс»:

- 1) Св-08, Св-08А + АН-348А, ОСЦ-45, К-11, КВС-19 (малоуглеродистая нелегированная проволока + высококремнистый марганцевый флюс);

- 2) Св-08Г2С + АН-5 (высокомарганцевая проволока + безмарганцевый плавный флюс);
  - 3) Св-08ГС + АН-8 – для электрошлаковой сварки.
- Наиболее часто при сварке применяются системы 1 и 3.

### ***Производство плавных флюсов***

Весь цикл делится на три стадии:

- 1) подготовка и расчет шихты;
- 2) плавление флюса;
- 3) грануляция и последующая обработка.

Плавление флюса производится в электрических или открытых подовых печах.

Грануляция может быть:

- мокрая, когда расплав выливается в воду;
- сухая, когда флюс выливают на противни, потом дробят (применяют для легированных сталей, так как содержание водорода снижается). Затем ведут просев и сушку флюса. Содержание влаги должно быть менее 0,1 %. Контроль качества флюса осуществляется при сварке.

Керамические флюсы изготавливают по следующей схеме:

- 1) дробление;
- 2) помол;
- 3) просев компонентов;
- 4) приготовление сухой смеси;
- 5) смачивание раствором жидкого стекла.

Грануляция флюса ведется двумя способами:

- 1) приготовление брикетов, сушка и дробление;
- 2) протирка массы через сито с отверстиями диаметром 3 мм.

## **6. Защитные газы**

Защитные газы делятся на две группы: химически инертные и активные. Газы первой группы с нагретым и расплавленным металлом не взаимодействуют и практически не растворяются в них. Газы второй группы защищают зону сварки от воздуха, но сами либо растворяются в жидком металле, либо вступают с ним в химическое взаимодействие.

Инертные газы используют при сварке как неплавящимися, так и плавящимися электродами. Активные газы применяют при сварке плавящимся электродом (проволокой) и угольным электродами.

К химически инертным защитным газам для сварки относят аргон и гелий. При сварке меди в качестве инертного защитного газа может использоваться азот. Этот газ является инертным только по отношению к химически чистой меди, но не к ее сплавам. Из химически активных газов основное значение имеет углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ). В ряде случаев для сварки может использоваться смесь углекислого газа с аргоном или углекислого газа с кислородом в соотношении 90 % и 10 % соответственно.

**Аргон** поставляется в баллонах серого цвета с зеленой надписью, в газообразном состоянии при давлении 150 атм. По ГОСТ 10157-73 аргон бывает трёх сортов: высший, первый и второй, — которые отличаются по содержанию примесей. Аргон высшего сорта предназначен для сварки химически активных металлов (титан, цирконий, ниобий); первого сорта — алюминия, магния и их сплавов; второго сорта — для сварки высоколегированной стали. Аргон тяжелее воздуха и при сварке хорошо защищает сварочную ванну от воздействия окружающей среды. Он не имеет цвета и запаха, и его присутствие может быть обнаружено лишь с помощью газоанализатора. Попадание аргона в легкие человека может вызвать удушье, а длительное вдыхание аргона приводит к летальному исходу.

**Гелий** поставляется в баллонах коричневого цвета с белой надписью при давлении 150 атм. В связи с тем что гелий в 10 раз легче аргона, расход гелия при сварке должен увеличиваться в 1,5...3 раза. Потенциал ионизации гелия выше, чем у аргона, поэтому напряжение на дуге при сварке в среде гелия почти в два раза выше, чем при сварке в среде аргона, при одинаковом значении силы тока. Это означает, что мощность дуги, горящей в среде гелия, почти в два раза выше, чем дуги в среде аргона. Широкое распространение гелиеводуговой сварки сдерживается высокой стоимостью этого инертного газа.

**Углекислый газ** поставляется по ГОСТ 8050-76 в баллонах черного цвета с желтой надписью, в сжиженном состоянии в виде углекислоты. Для сварки используют сварочную углекислоту I и II сортов, которые отличаются содержанием паров воды. Применение



углекислого газа для сварки металла в качестве защитного вызывает необходимость применения специальной проволоки. Она должна содержать дополнительное количество легирующих элементов с большим сродством к кислороду – марганца и кремния. Эти элементы раскисляют сварочную ванну, а пары воды, содержащиеся в  $\text{CO}_2$ , устраняют путем осушки газа. Именно для осушки и интенсивной подачи углекислого газа в зону сварочной ванны на баллоне предусмотрен предохранительный осушитель и подогреватель газа.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Кто является создателем первого сварочного трансформатора?
2. Кто является основоположником способов сварки плавящимся электродом?
3. Как маркируются электроды вольфрамовые лантанированные?
4. Как маркируются проволоки сварочные цельнометаллические и порошковые проволоки для сварки стали?
5. Как классифицируются сварочные флюсы по способу изготовления, по содержанию марганца и кремния?
6. Какие функции выполняет порошок, входящий в состав порошковой проволоки?
7. Чем отличаются плавные и керамические флюсы для сварки?
8. Каково условное обозначение покрытых электродов для сварки стали?
9. В каком состоянии поставляется для сварки углекислый газ?
10. К какой группе газов относятся аргон и гелий?

## Модуль 2

# СПОСОБЫ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ И ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ МЕТАЛЛОВ

### Тема 3. Ручная дуговая сварка и наплавка

#### *Учебные вопросы*

1. Выбор режима сварки.
2. Техника ручной дуговой сварки.
3. Высокопроизводительные способы ручной сварки.

#### **1. Выбор режима сварки**

Режимом сварки называется совокупность заданных параметров и условий процесса сварки. Основные параметры режима ручной дуговой сварки – сила, род и полярность тока, диаметр электрода. Напряжение на дуге (длина дуги) и скорость сварки в технологии не оговариваются.

Дополнительные параметры режима – состав и толщина покрытия, начальная температура металла, положение электрода и изделия в пространстве. От выбора параметров режима зависят глубина провара и ширина шва. При выборе диаметра электрода руководствуются толщиной свариваемого металла, положением шва в пространстве, размерами изделия. При этом выбирается соотношение между диаметром электрода  $d_{эл}$  и толщиной свариваемого изделия по схеме:

|                                  |           |   |       |        |            |
|----------------------------------|-----------|---|-------|--------|------------|
| толщина свариваемого изделия, мм | 1...2     | 3 | 4...5 | 6...12 | 13 и более |
| диаметр электрода, мм            | 1,5...2,5 | 3 | 3...4 | 4...5  | 5...8      |

Сила тока выбирается по формуле  $I_{св} = (35...60)d_{эл}$ .

При увеличении силы сварочного тока повышается погонная энергия и давление дуги на сварочную ванну, что увеличивает глубину провара. Ширина шва увеличивается при этом незначительно. Уменьшение диаметра электрода приводит к увеличению глубины провара, так как с уменьшением диаметра увеличивается плотность тока и уменьшается подвижность столба дуги. С увеличением напря-

жения (длины дуги) ширина шва заметно возрастает. С увеличением скорости сварки снижается погонная энергия, уменьшается глубина проплавления и ширина шва. Предварительный подогрев деталей до 100...140 °С приводит к увеличению глубины провара и ширины шва.

По положению электрода в пространстве различаются способы сварки вертикальным электродом, углом вперед и углом назад (рис. 2.1).

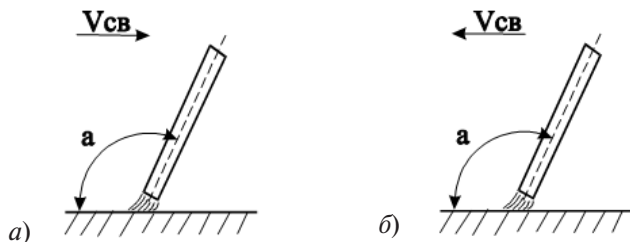


Рис. 2.1. Способы выполнения сварки:  
а – углом назад; б – углом вперед

При сварке углом вперед (рис. 2.1, б) уменьшается глубина провара, увеличивается ширина шва. В этом случае дуга располагается над вытесненным из средней части сварочной ванны жидким металлом, и передача тепла от дуги твердому металлу ухудшается. Давление дуги экранируется прослойкой жидкого металла, вытесненного из сварочной ванны. При сварке углом назад (рис. 2.1, а) жидкий металл ванны лучше вытесняется в сторону шва, дно ванны обнажается, теплоотдача от дуги к основному металлу улучшается. В результате глубина провара увеличивается, ширина шва уменьшается.

## 2. Техника ручной дуговой сварки

Техникой сварки называется совокупность манипуляций электродом, обеспечивающих требуемые размеры, форму и качество шва. Первым действием в процессе сварки является зажигание дуги. Зажигание дуги производится прикосновением торца электрода, подключенного к полюсу источника тока, к свариваемому металлу, соединенному с другим полюсом того же источника, с последующим быстрым отводом торца электрода на расстояние 3...4 мм. До зажигания дуги напряжение между электродом и свариваемым изделием

обычно не менее 60 В. В момент замыкания электрода на изделие напряжение падает почти до нуля, после зажигания дуги и нормального ее горения напряжение поддерживается в пределах 16...30 В в зависимости от длины дуги и типа электрода. Возбуждение дуги можно производить также чирканьем электрода по поверхности свариваемого металла.

В процессе сварки следует поддерживать определенную длину дуги, которая зависит от марки и диаметра электрода. Ориентировочно, нормальная длина дуги составляет от 0,5 до 1,1 диаметра электрода. Длина дуги оказывает большое влияние на качество сварного шва и его геометрическую форму. Длинная дуга способствует более интенсивному окислению и азотированию расплавляемого металла, увеличивает разбрызгивание электродного металла, приводит к пористости шва. При обрыве дуги нужно вновь зажигать ее либо несколько впереди кратера, либо на шве, для того чтобы тщательно расплавить образовавшийся при обрыве дуги кратер.

### *Движение электрода*

Во время сварки сварщик должен сообщать электроду движения в трех направлениях:

- 1) поступательное движение – по направлению оси электрода;
- 2) вдоль шва – для образования шва. При малой скорости движения может произойти перегрев или прожог. При большой скорости может получиться непровар в шве. При правильно выбранной скорости передвижения электрода вдоль шва ширина валика должна быть на 2...3 мм больше диаметра электрода;
- 3) перемещение электрода поперек шва для получения расширенного валика.

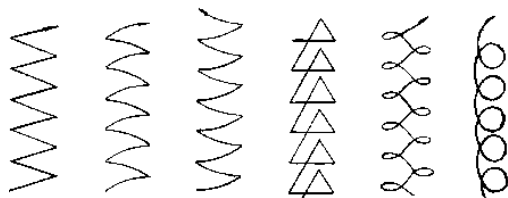


Рис. 2.2. Основные траектории движения торца электрода при ручной дуговой сварке расширенных валиков

Поперечные движения разнообразны и определяются формой, размерами, положением сварного шва в пространстве, формой подготовки свариваемых кромок и навыком сварщика (рис. 2.2).

### *Техника сварки коротких, средних и длинных швов*

В зависимости от длины швы делятся на короткие (до 250 мм), средние (250...1000 мм), длинные (более 1000 мм). Короткие варятся напроход, средние – от середины к краям, длинные – обратноступенчатым способом, от середины к краям детали. Такой способ приводит к снижению остаточных деформаций изделия (коробления), возникающих при кристаллизации сварного шва. Сварка ведется в направлении от участков с большей жесткостью к участкам с меньшей жесткостью. Ручную дуговую сварку конструкций большой толщины (больше 10 мм) выполняют «каскадом», «блоками» или «горкой». Это позволяет снизить сварочные напряжения в сварном соединении, получить достаточно измельченную структуру металла шва и незначительно снизить механические свойства сварного соединения по сравнению со свойствами основного металла (рис. 2.3).

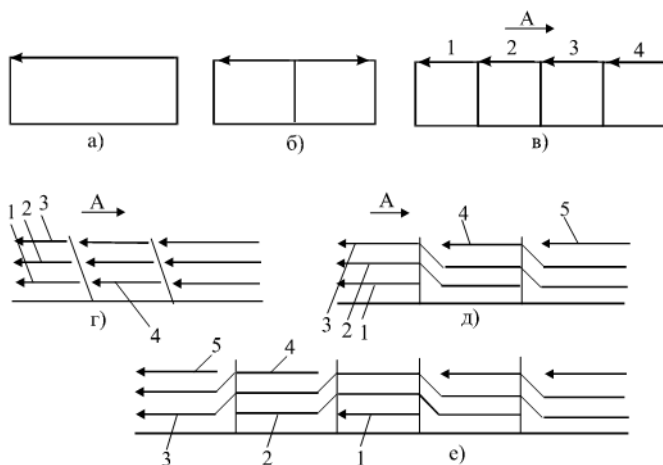


Рис. 2.3. Техника варки швов: *а* – напроход; *б* – от середины к краям; *в* – обратноступенчатым способом; *г* – блоками; *д* – каскадом; *е* – горкой

При сварке швов со скосом кромок сварку ведут в несколько проходов, корень разделки проваривают электродами диаметром

3...4 мм без поперечных колебаний. Последующие слои выполняются электродами большего диаметра с поперечными колебаниями (рис. 2.4). Для обеспечения хорошего провара между слоями предыдущие швы и кромки необходимо очищать от шлака и брызг металла.

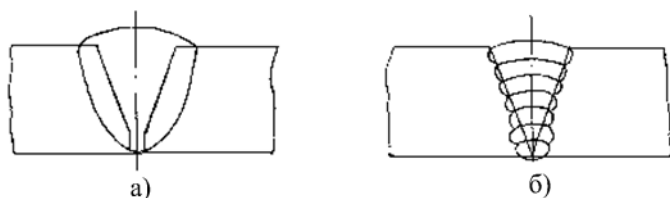


Рис. 2.4. Поперечное сечение стыковых швов:  
а — однопроходных; б — многопроходных

По положению швов в пространстве различают следующие швы: нижние, выполняемые на горизонтальной поверхности; вертикальные, выполняемые на вертикальной поверхности; горизонтальные, выполняемые по горизонтали на вертикальной поверхности; потолочные, выполняемые при расположении сварщика под изделием, при сварке как бы по потолку.

Сварка *вертикальных* швов более сложная по сравнению со сваркой в нижнем положении. Расплавленный металл под действием силы тяжести стремится вытечь из сварочной ванны, поэтому сварка вертикальных швов должна выполняться более короткой дугой. Поскольку расплавленный металл сварочной ванны удерживается от вытекания в основном только силой поверхностного натяжения, то необходимо уменьшать объем сварочной ванны. С этой целью для сварки вертикальных швов применяют пониженную на 10...20 % силу тока и электроды уменьшенного диаметра (3...4 мм). Сварку вертикальных швов можно выполнять на подъем или на спуск. При сварке на подъем закристаллизовавшийся металл шва помогает удержать расплавленный металл сварочной ванны, и облегчается возможность провара корня шва и кромок. При сварке на спуск получить качественный провар труднее, так как шлак и расплавленный металл затекают в зазор, препятствуя сплавлению кромок. Сварку на спуск проводят обычно при сварке тонкого металла или с применением специальных электродов.

Сварка *горизонтальных* швов затруднена из-за стекания расплавленного металла из сварочной ванны на нижнюю кромку. Поэтому для сварки обычно делают скос только верхней кромки, а нижняя кромка помогает удерживать расплавленный металл в сварочной ванне.

Сварка швов *в потолочном положении* наиболее сложна. Ее выполняют периодическими короткими замыканиями торца электрода на сварочную ванну, во время которых расплавленный металл частично кристаллизуется. Качество сварного соединения здесь ниже, чем при сварке в других положениях, так как в шве остаются неметаллические включения. Иногда для сварки потолочных швов применяют специальные тугоплавкие электроды.

### 3. Высокопроизводительные способы ручной сварки

#### *Сварка методом опирания*

Сварка проводится электродами с увеличенной толщиной покрытия. Электрод опирается на образующийся при его плавлении козырек из нерасплавившегося электродного покрытия. При этом способе, благодаря концентрации тепла в небольшом пространстве, ограниченном козырьком, достигается значительная глубина провара. Производительность увеличивается на 50 %. Сварка производится на максимально допустимых токах и с большой скоростью. Наклон электрода к горизонту  $70...85^\circ$ . Сила тока выбирается по формуле  $I = 60d_3$ . Сварка методом опирания также называется сваркой ультракороткой дугой (рис. 2.5).

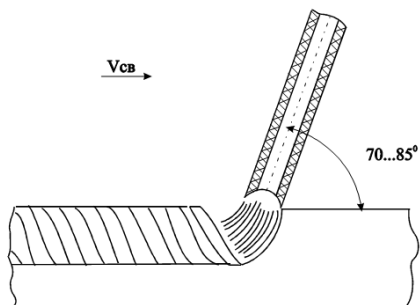


Рис. 2.5. Образование провара при сварке методом опирания

### *Сварка пучком электродов*

Способ заключается в одновременной работе двумя, тремя и более электродами, изолированными друг от друга. Электроды соединяются в пучок прихваткой в месте зажима их в электрододержателе. Напряжение от источника питания подводится одновременно ко всем электродам. Дуга горит между изделием и тем электродом, где на образование дугового разряда затрачивается меньше энергии. Как правило, это электрод, торец которого находится в данный момент ближе к изделию. Как только этот электрод оплавляется, дуга возбуждается на другом электроде, расположенном в этот момент ближе к свариваемому изделию. Процесс плавления электродов повторяется. Этот метод повышает эффективность использования тепла дуги и снижает потери электродного металла на угар и разбрызгивание. Экономится время на смену электродов, производительность повышается на 30 %.

### *Сварка трехфазной дугой плавящимися электродами*

Этот способ требует применения специального электрода и электрододержателя (рис. 2.6). Ток подводится отдельно к каждому из стержней.

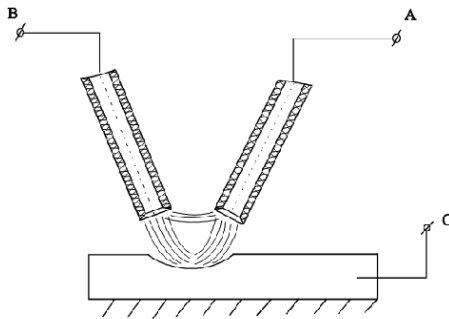


Рис. 2.6. Схема сварки трехфазной дугой плавящимися электродами

При этом две фазы трехфазного источника питания присоединяются к электрододержателю специальной конструкции, третья — к свариваемому изделию. Расстояние между электродами составляет 5...6 мм. Расплавление металла производится тремя дугами, поэтому возрастает скорость плавления электродов, и производительность сварки увеличивается почти в 2 раза. Однако техника выполнения



швов затруднена из-за большого веса электродов и держателя. Трехфазной дугой выгодно сваривать стыковые и тавровые соединения с большой величиной разделки кромок, а также заваривать крупногабаритные дефекты литья.

### ***Безогарковая сварка***

Сущность способа заключается в том, что электрод с покрытием по всей длине приваривается торцом к держателю. Это устраняет потери электродного металла на огарки. Недостатки метода: меньшая технологическая маневренность при сварке и большая сложность приварки по сравнению с зажатием в обычных держателях. Метод эффективен в том случае, когда стоимость электрода и свариваемого изделия достаточно высокая.

### ***Сварка ванным способом***

Расплавление кромок основного металла происходит в значительной мере за счет тепла, передаваемого изделию ванный жидкого металла, поэтому сварку производят обычно при повышенной силе тока.

Этот способ получил широкое применение при соединении стержневых изделий, например арматуры железобетонных изделий диаметром до 100 мм, железнодорожных рельсов и т. п. Сварку ванным способом можно выполнять как одним электродом, так и несколькими. Стержни собирают с зазором 12...16 мм в остающейся стальной или съемной медной, графитовой или керамической форме (рис. 2.7). Сварку начинают в нижней части формы и до окончания сварки металл сварочной ванны на всю ширину зазора и формы поддерживают в расплавленном состоянии. Металл сварного шва наплавляют несколько выше поверхности свариваемых стержней с целью формирования усиления.

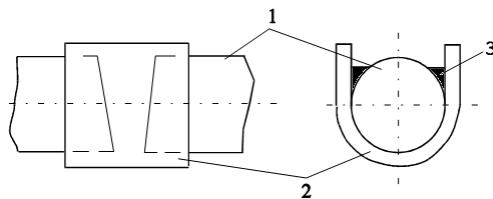


Рис. 2.7. Сборка под ванную сварку горизонтальных стержней арматуры:  
1 – свариваемые стержни; 2 – форма; 3 – прихватки

### *Сварка лежачим и наклонным электродами*

Лежачим электродом (рис. 2.8) сваривают стыковые, нахлесточные и угловые швы. Для сварки используют электроды диаметром 2,5...8 мм и длиной до 2000 мм. Электроды укладывают на стык, накрывают сверху массивным медным бруском. Один из концов электрода подключают к полюсу сварочного источника питания. Дуга зажигается замыканием рабочего конца электрода угольным стержнем на свариваемый металл и перемещается по стыку по мере плавления электрода, постепенно расплавляя его и основной металл и образуя шов. Повышение производительности труда достигается за счёт одновременного обслуживания одним сварщиком нескольких сварочных постов.

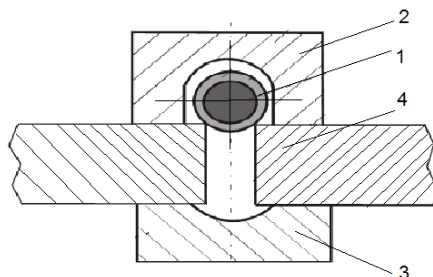


Рис. 2.8. Схема сварки лежачим электродом: 1 – электрод; 2 – медный брусок; 3 – медная съемная подкладка; 4 – свариваемые пластины

Сварку наклонным электродом иногда называют «гравитационной сваркой». Электрод закрепляется на ползуне штатива под некоторым углом к поверхности свариваемого изделия (рис. 2.9). Сам штатив устанавливается на поверхности изделия через изолирующую прокладку. По мере оплавления электрода ползун опускается под действием своего веса, тем самым обеспечивая продвижение сварочной дуги по стыку. Токоподвод осуществляется непосредственно к электроду или к ползуну. Глубина проплавления, ширина шва и скорость сварки регулируются изменением угла наклона электрода и силой тока. Сварщик обслуживает обычно две или три установки. Производительность ручной сварки также повышается за счет применения электродов с железным порошком в покрытии. Сварка возможна только в нижнем положении, так как в дру-

гих пространственных положениях увеличенный размер сварочной ванны приводит к вытеканию из нее расплавленного металла.

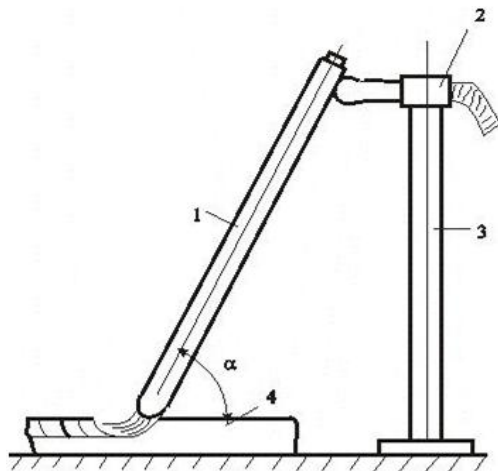


Рис. 2.9. Сварка наклонным электродом:  
1 – электрод; 2 – ползун; 3 – штатив; 4 – изделие

#### **Тема 4. Автоматическая и механизированная сварка и наплавка под слоем флюса**

##### *Учебные вопросы*

1. Сущность, преимущества и недостатки способа.
2. Разновидности автоматической сварки под слоем флюса.
3. Механизированная сварка под слоем флюса.
4. Техника автоматической сварки под слоем флюса.

##### **1. Сущность, преимущества и недостатки способа**

Дуга горит в закрытой полости (рис. 2.10), защищенной от воздействия атмосферы эластичной оболочкой расплавленного флюса. Металл шва состоит на  $2/3$  из расплавленного основного металла и на  $1/3$  из расплавленного присадочного металла. При автоматической сварке механизированы следующие операции: 1) возбуждение дуги; 2) поддержание горения дуги; 3) подача электродной проволоки; 4) перемещение дуги вдоль шва; 5) заварка кратера в конце шва.

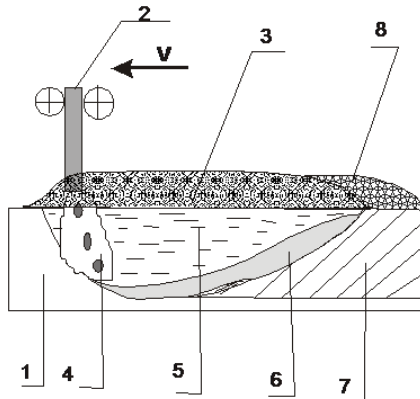


Рис. 2.10. Схема процесса автоматической сварки под слоем флюса:  
 1 – изделие; 2 – электродная проволока с токоподводом; 3 – слой флюса;  
 4 – сварочная дуга с каплями электродного металла; 5 – жидкий шлак;  
 6 – хвостовая часть сварочной ванны; 7 – сварной шов; 8 – шлаковая корка

### *Преимущества способа сварки под слоем флюса*

1. Производительность процесса в 5...10 раз выше производительности при ручной дуговой сварке. Результат достигается за счет:

а) увеличения плотности тока дуги благодаря максимальному приближению точки токоподвода к сварочной дуге и наличию защитного флюса. При ручной сварке плотность тока не превышает  $10 \text{ А/мм}^2$  ( $d = 5 \text{ мм}$ ,  $I_{\text{св}} = 200 \text{ А}$ ). При сварке под флюсом плотность тока  $40...50 \text{ А/мм}^2$  ( $d = 5 \text{ мм}$ ,  $I_{\text{св}} = 800...1000 \text{ А}$ ). При сварке тонкой проволокой ( $d = 1,6...2 \text{ мм}$ ) – плотность тока  $70...100 \text{ А/мм}^2$ ;

б) сокращения машинного времени вследствие повышения скорости сварки. Это стало возможным только из-за применения больших токов, увеличения концентрации тепловой энергии в зоне нагрева, повышения коэффициента полезного действия сварочной дуги и применения специальных технологических приемов. Например, скорость ручной сварки  $V_{\text{св}} = 6...8 \text{ м/ч}$ , скорость сварки под флюсом  $30...40 \text{ м/ч}$  и в особых случаях до  $120...160 \text{ м/ч}$  (сварка труб);

в) уменьшения количества наплавленного присадочного металла вследствие глубокого проплавления основного металла. Это дает возможность варить стыковые швы без разделки кромок, без зазора до 20 мм и с зазором свыше 20 мм. Кроме того, угол разделки кромок

составляет 60...45°, что также способствует уменьшению количества наплавленного присадочного металла;

г) повышения коэффициента наплавки от 8...12 г/(А·ч) при ручной сварке до 14...16 г/(А·ч) при однодуговой сварке под флюсом.

2. Высокое качество металла шва и сварного соединения в целом, которое достигается за счет:

а) надежной защиты сварочной ванны от воздействия кислорода и азота воздуха;

б) получения металла шва более однородного по химическому составу благодаря стабильности режима сварки, а значит, постоянного соотношения количества расплавляемого присадочного и основного металла и взаимодействующего с ними флюса;

в) увеличения плотности металла (без пористости шлаковых включений) шва, формирования его без наплывов, подрезов и чешуйчатости.

3. Социально-экономические преимущества, которые достигаются за счет:

а) отсутствия необходимости защиты глаз и лица сварщика от светового излучения и брызг расплавленного металла;

б) улучшения условий труда сварщика, снижения вредности производства;

в) экономии электродного металла на угар, разбрызгивание и огарки, а также экономии электроэнергии вследствие повышения КПД процесса.

## **2. Разновидности автоматической сварки под слоем флюса**

### *Двухдуговая сварка в общем плавильном пространстве*

Применяется для сварки толстолистовой стали за один проход. На первый электрод подается максимально возможный ток, что способствует проплавлению металла на всю толщину. Дуга, горящая со второго электрода, обеспечивает формирование шва без подрезов, пористости и создает усиление шва (рис. 2.11, а).

### *Трехдуговая сварка в общем плавильном пространстве*

Применяется для сварки толстолиствого металла за один проход с большой скоростью. Первый электрод подогревает и ча-

стично расплавляет поверхность металла. Обычно первому электроду придают поперечные колебания с определенной амплитудой и частотой в зависимости от заданной ширины шва. Второй электрод способствует проплавлению металла на максимальную глубину. Третий электрод наносит косметический валик для качественного формирования усиления сварного шва (рис. 2.11, б).

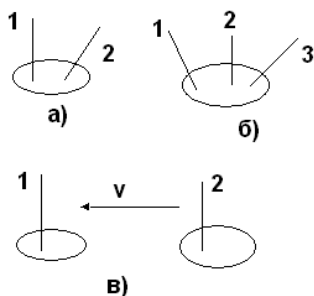


Рис. 2.11. Схемы разновидностей автоматической сварки: а – двухдуговая сварка в общую сварочную ванну; б – трехдуговая сварка в общую сварочную ванну; в – сварка разнесенными дугами

### ***Сварка разнесенными дугами***

Применяется для производства сварных конструкций из стали, склонной к образованию горячих или холодных трещин. Сварка второй дугой должна вестись по расплавленному шлаку, иначе процесс будет неустойчивый. Этот способ позволяет значительно повысить пластические свойства сварного соединения за счет снижения скорости охлаждения сварного шва и околошовной зоны (рис. 2.11, в).

### ***Многоголовочная сварка и сварка способом «тандем»***

Многоголовочная сварка (рис. 2.12, а) применяется для сварки длинномерных швов. Каждая сварочная головка проваривает свой участок шва. Например, двутавровые балки длиной 12 метров варят восемью головками по 15 штук в смену. Для сварки толстолистовых конструкций из черных металлов применяется способ сварки «тандем» (рис. 2.12, б). Максимальная толщина свариваемого металла составляет 30...32 мм.

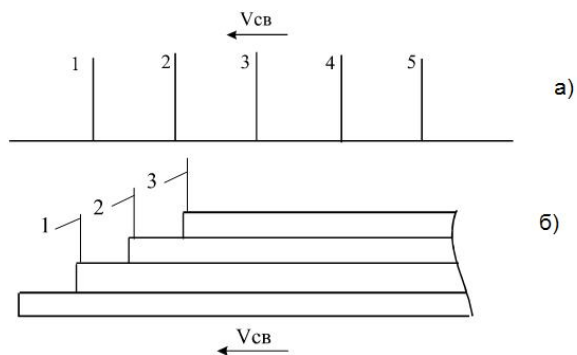


Рис. 2.12. Схемы выполнения процесса автоматической сварки под флюсом: *а* – методом многоголовочной сварки; *б* – методом «тандем»

### 3. Механизируемая сварка под слоем флюса

При механизированной сварке под слоем флюса плавящимся электродом механизуется подача сварочной проволоки в зону дуги. Для этого служит подающий механизм – сварочная головка. Манипуляции дугой для поддержания заданного режима, придания шву нужной формы и перемещение дуги по мере наложения шва вдоль свариваемых кромок осуществляются рабочим, обслуживающим полуавтомат вручную. Сварочная проволока от подающего механизма к держателю в большинстве случаев поступает по гибкому шлангу, поэтому часто полуавтоматическую сварку называют шланговой (рис. 2.13).



Рис. 2.13. Сварочная горелка А1231-5-Ф2 для механизированной сварки под слоем флюса

Главное достоинство механизированной сварки заключается в том, что можно выполнять такие швы, которые невыгодно или неудобно сваривать автоматом. Благодаря шланговой механизированной сварке значительно повысилась производительность сварочных работ.

Недостатки:

- 1) трудность точного ведения электрода вдоль линии шва, так как место сварки закрыто флюсом;
- 2) перемещение держателя производится вручную, что обуславливает зависимость качества сварки от квалификации сварщика, его утомляемости.

Существуют две разновидности механизированной сварки под флюсом: сварка электродзаклепками и стыкодуговая.

### *Сварка электродзаклепками*

Сущность способа заключается в том, что электрод без покрытия вставляется в губки электрододержателя (сварочного пистолета или электродзаклепочника). После этого торец электрода вводится в контакт со свариваемым изделием, и место сварки засыпается флюсом. После включения сварочного тока возбуждается дуга, горение которой после истечения нескольких секунд прекращается, так как электрод оплавляється на некоторую длину, а подача электрода отсутствует. После окончания сварки флюс и шлак удаляются. Время сварки в зависимости от толщины свариваемых листов, диаметра электрода, напряжения, величины тока короткого замыкания и состава флюса может составлять от 1,5 до 5 секунд (рис. 2.14).

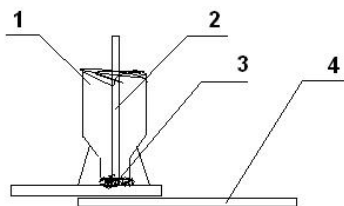


Рис. 2.14. Схема сварки электродзаклепками: 1 – электродзаклепочник; 2 – электрод; 3 – место электродзаклепки; 4 – свариваемые листы

Сварка электродзаклепками не требует высокой квалификации сварщика. Она применяется там, где использование контактной



точечной сварки затруднено. При сварке электрозаклепками металла достаточно большой толщины (больше 5 мм) в верхнем листе просверливается или прокалывается отверстие. Диаметр отверстия должен превышать диаметр электрода на 2...6 мм. Диаметр электрозаклепок обычно равен 2...4 толщинам свариваемых листов.

Преимущества сварки электрозаклепками:

- 1) производительность труда возрастает в 2,5...3 раза по сравнению с ручной дуговой сваркой;
- 2) при сварке электрозаклепками не требуется точной подгонки и тщательной очистки свариваемых листов, как при контактной сварке;
- 3) простота и надежность сварочной аппаратуры;
- 4) изготовленные конструкции практически не имеют деформаций.

Недостатки сварки электрозаклепками:

- 1) необходимость пробивки отверстия в верхнем листе при толщине верхнего листа выше 5 мм;
- 2) производительность сварки ниже, чем при контактной сварке;
- 3) невозможность обеспечения герметичности конструкции.

### *Дуговая сварка с осадкой электрода (стыкодуговая)*

Способ применяется для приварки шпилек, штифтов, болтов и других стержневых элементов диаметром от 2 до 20 мм к плоским, сферическим или цилиндрическим поверхностям. Процесс состоит из двух стадий: дугового процесса и последующей осадки (вдавливания) электрода в расплавленный металл.

Дуга возбуждается между основным металлом и привариваемой деталью, являющейся электродом. Электрод закрепляется в специальном держателе (пистолете). Механизм и электрическая схема питания пистолета обеспечивают возбуждение дуги, поддержание ее в период, необходимый для образования сварочной ванночки и осадки детали. Длительность процесса сварки в зависимости от режима и сечения детали составляет от 0,1 до 2 сек. Для защиты металла сварочной ванны от окружающего воздуха применяют специальные флюсовые шайбы (кольца), которые изготавливаются из прессованного флюса. Если приварка деталей производится в нижнем положении, то шайба заменяется просто флюсом.

## 4. Техника автоматической сварки под слоем флюса

### *Сварка стыковых швов*

Стыковые швы можно разделить на две основные группы: односторонние и двусторонние, которые, в свою очередь, подразделяются на сварку с разделкой кромок и без разделки кромок. Чтобы воспрепятствовать вытеканию жидкого металла и шлака в зазор между свариваемыми кромками, сварку стыковых швов производят с помощью следующих приспособлений:

- 1) на флюсовой подушке;
- 2) на медной и флюсо-медной подкладке;
- 3) «в замок»;
- 4) на остающейся технологической подкладке;
- 5) после ручной подварки корня шва;
- 6) на весу.

Стыковые соединения листов стали толщиной до 20 мм в нижнем положении обычно сваривают односторонними односторонними швами.

### *Техника сварки односторонних швов*

Для получения полного провара сварку выполняют на флюсовой подушке (рис. 2.15). Принцип действия флюсовой подушки заключается в том, что к нижней стороне свариваемых листов поджигается слой флюса, препятствующий вытеканию сварочной ванны. Между листами должен быть зазор 4...5 мм. Качество формирования швов определяется равномерностью поджигания флюсовой подушки и равномерностью зазора в стыке. Если флюс недостаточно поджат, то образуется обратный валик, а усиление шва отсутствует. Излишнее большое поджатие приводит к образованию сплошной канавки или вмятины корня шва. Иногда давление флюса бывает настолько большим, что расплавленный флюс «подушки» прорывается наружу сквозь слой жидкого металла, образуя в шве сквозные отверстия. Оптимальное давление флюса зависит от режима сварки. Прижатие флюса создается резиновым эластичным шлангом, в который подается сжатый воздух. Широкое распространение при сварке листов толщиной 2...8 мм получили электромагнитные стенды. Электромагниты удерживают листы в горизонтальном положении, а шланг

ги со сжатым воздухом снизу поджимают флюс. При сварке листов толщиной более 12 мм искусственными средствами для прижатия флюса не пользуются. Прижатие обеспечивается благодаря собственному весу изделия, укладываемого на флюсовую подушку. Недостатком такого способа сварки является трудность обеспечения равномерности поджатия флюса со стороны корня шва, вследствие чего возникают дефекты обратного валика.

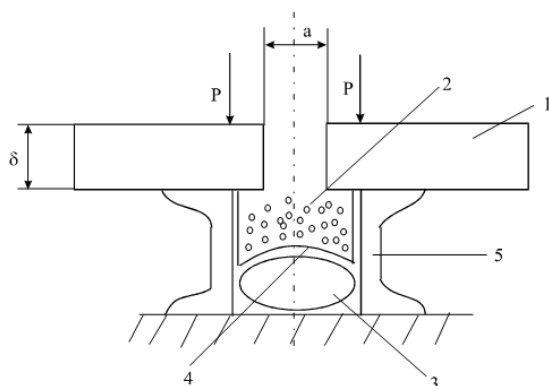


Рис. 2.15. Схема сварки на флюсовой подушке: 1 – изделие; 2 – флюс; 3 – воздушный шланг; 4 – латунный лоток с флюсом; 5 – сварочный стол

### ***Сварка на гладкой медной подкладке***

Этот способ обеспечивает получение качественных швов при условии плотного поджатия подкладки к свариваемым краям со стороны корня шва. Наличие зазоров не допускается. В производственных условиях трудно соблюсти такие жесткие требования, предъявляемые к сборке изделий, особенно при сварке толстолистового материала длинномерными швами. Поэтому этот способ не нашел широкого практического применения.

### ***Сварка на флюсо-медной подкладке***

Сущность способа (рис. 2.16) заключается в искусственном создании между медной подкладкой и нижней стороной свариваемых листов тонкой флюсовой прослойки. Флюс насыпают через зазор между кромками или на подкладку до укладки листов. Размеры канавки для формирования корня шва: ширина 12...20 мм, глубина 1,5...2,5 мм.

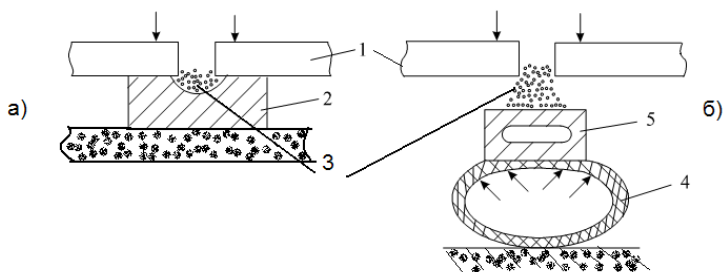


Рис. 2.16. Схема сварки на флюсо-медной подкладке: *а* – на жесткой флюсо-медной подкладке; *б* – на флюсо-медной водоохлаждаемой подкладке (*1* – изделие; *2* – подкладка с канавкой; *3* – слой флюса; *4* – пневматический шланг; *5* – водоохлаждаемая подкладка)

Слой флюса между кромками и подкладкой играет роль флюсовой подушки. Наличие медной подкладки устраняет опасность проседания швов в случае неравномерного поджатия. Обладая положительными особенностями флюсовой подушки и медной подкладки, флюсо-медная подкладка не имеет их недостатков. При сварке листов толщиной до 6...8 мм прижатие к флюсо-медной подкладке можно осуществить с помощью электромагнитов. При сварке листов толщиной более 6...8 мм требуются большие усилия для сведения кромок в одну плоскость, поэтому применяются гибкие флюсо-медные подкладки.

Гибкая флюсо-медная подкладка состоит из коротких медных пластин (80...120 мм), укладываемых впритык одна к другой. Гибкость подкладки достигается благодаря укладке медных пластин на флюсовую постель. Короткие медные пластины могут поворачиваться одна относительно другой, поджатие осуществляется шлангом со сжатым воздухом.

Флюсо-медные подкладки применяются при сварке односторонних кольцевых швов. Для сварки кольцевых швов диаметром 400...800 мм применяются подкладки неподвижные и перекатывающиеся (рис. 2.17):

*а*) неподвижная подкладка. Необходимое условие – плотное поджатие подкладки к свариваемым кромкам. Сборка стыков производится с обязательным зазором. Здесь повышены требования к качеству сборки: овальность обечаек, выпучивание кромок не допускается;

б) перекатывающаяся подкладка. Преимущество: допускается овальность и выпучивание кромок, которые выравниваются благодаря гибкости перекатывающейся подкладки.

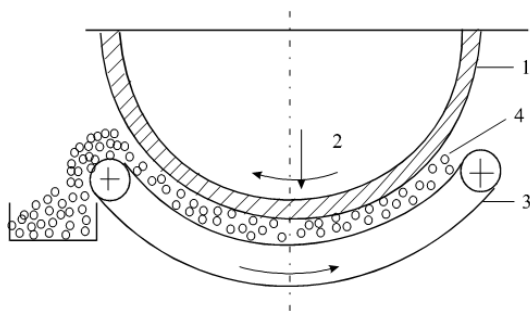


Рис. 2.17. Схема сварки кольцевых швов на флюсо-медной перекатывающейся подкладке: 1 – изделие; 2 – электрод; 3 – гибкая лента; 4 – флюс

### ***Сварка на остающейся подкладке***

Способ применяется для соединения тонких листов до 10 мм. Подкладка должна быть плотно пригнана к свариваемым кромкам. При сварке частично проплавляется подкладка и приваривается к нижней части кромок. Зазор между подкладкой и кромками должен быть не более 0,5...1 мм. Сварка применяется в тех случаях, когда наличие подкладки по конструкции допустимо.

### ***Автоматическая сварка после предварительной ручной подварки корня шва***

В этом случае необходимости в точной сборке и подготовке кромок нет. Предварительный шов должен быть проварен на 1/3 толщины, так как второй шов выполняется на весу. Способ неэкономичен, применяется при сварке некантуемых изделий электродами типа Э42, Э42А.

### ***Сварка на весу***

Сварка возможна при условии плотной и точной сборки кромок без зазора. Глубина провара не должна превышать 2/3 толщины металла. Применяется в неответственных конструкциях и при сварке тонколистового металла.

### *Сварка двусторонних швов*

Является основным производительным способом сварки под флюсом стыковых швов металла толще 12...14 мм. Способ менее экономичен по сравнению с односторонней сваркой, но зато менее чувствителен к колебаниям режима сварки, отклонению электрода от линии стыка и не требует сложных устройств для получения полного провара кромок. Техника сварки не отличается от сварки односторонних швов, но не предусматривает сквозного проплавления кромок.

### *Сварка с подачей ППМ на вылет электрода*

Существующие способы сварки под флюсом с применением порошкового присадочного материала (ППМ) предполагают введение порошка либо перед сваркой в зазор между кромками, либо в смеси его с флюсом. В первом случае недостаточно полно используется тепло дуги на расплавление порошка и совсем не используется избыток тепла в хвостовой части сварочной ванны. При сварке со смесью флюса и порошка нарушается однородность химического состава по длине шва, а количество порошка во флюсе ограничено из-за шунтирования дуги.

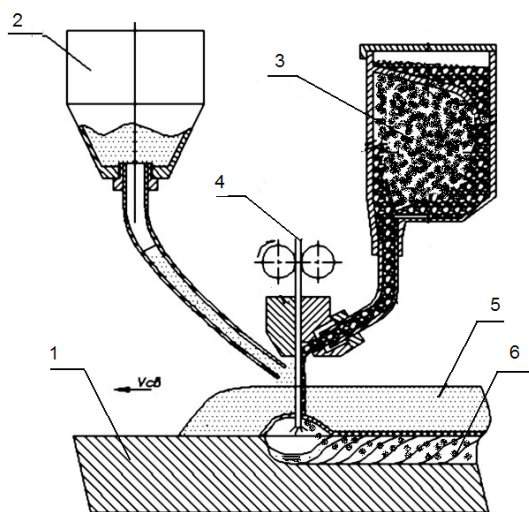


Рис. 2.18. Схема процесса сварки с подачей ППМ на вылет электрода:  
1 – изделие; 2 – бункер с флюсом; 3 – бункер с ППМ; 4 – электродная проволока; 5 – слой флюса; 6 – наплавленный валик

Здесь (рис. 2.18) реализована идея транспортировки магнитного флюса электромагнитным полем электрода. ППМ подается на вылет электрода с одной стороны и притягивается с этой же стороны. ППМ, подходя к плавильному пространству, отстает от электрода, нагреваясь до температуры потери магнитных свойств. Незначительная часть ППМ по инерции проходит через дугу, вызывая шунтирование, остальная часть, минуя дугу, опускается в хвостовой части сварочной ванны, расплавляясь за счет избытка тепла в этой зоне.

В качестве порошкового присадочного материала рекомендуется крупка из сварочной проволоки диаметром 0,8...2 мм. Целесообразно подавать ППМ на вылет электрода массой от 0,8 до 1,2 от массы электродной проволоки.

Для уменьшения потерь тепла в сварочной ванне и увеличения КПД процесса, а также с целью повышения качества сварного шва рекомендуется совмещать способ сварки с подачей ППМ на вылет электрода со сваркой по слою ППМ, предварительно засыпанному в зазор. Такой способ сварки обычно применяется при сварке металла толщиной более 22 мм.

Преимущество вышеуказанных способов сварки заключается в том, что технологическая прочность сварных соединений возрастает в 1,7...2 раза, т. е. в шве и околошовной зоне не возникают горячие трещины. Повышение сопротивляемости образованию горячих трещин объясняется измельчением первичной структуры сварного шва за счет попадания ППМ в хвостовую часть сварочной ванны. Кроме того, при сварке с подачей ППМ на вылет электрода уменьшается величина участка перегрева в зоне термического влияния (часть тепла сварочной ванны расходуется на плавление ППМ), а также увеличивается коэффициент наплавки. Для дозировки и подачи ППМ разработаны специальные приставки.

#### *Автоматическая сварка под флюсом на подушке из ППМ*

Способ сварки на флюсовой подушке имеет ряд недостатков:

- 1) необходимость зачистки корня шва;
- 2) образование шлаковых каналов в сварном шве из-за неравномерности давления флюсовой подушки со стороны корня шва;

3) образование горячих трещин в шве, вследствие того что кристаллиты растут навстречу друг другу и встречаются в центре шва, образуя здесь ослабленную прослойку из интерметаллидов и примесей.

Способ сварки на подушке из ППМ позволяет увеличить теплоотвод со стороны корня шва. В данном случае рост кристаллитов осуществляется не только навстречу друг другу, но и в сторону усиления шва. Причем кристаллиты зарождаются на полуоплавленных частицах ППМ, которые являются центрами кристаллизации. В результате образуется объемная схема кристаллизации, приводящая к измельчению зерна в сварном шве, что существенно снижает вероятность образования горячих трещин. Качественные соединения без трещин могут быть получены даже при зазорах 5...10 мм. Увеличение теплоотвода со стороны корня шва также способствует увеличению скорости охлаждения всего сварного соединения, что приводит к измельчению зерна за счет появления схемы дендритного или автономного роста кристаллитов.

Для сварки низкоуглеродистой и низколегированной стали применяют крупку из проволоки  $d = 0,8...2$  мм марок Св-08, Св-08ГА, Св-08Г2С, Св-10Г2, Св-ХМА, Св-10ХМ. Конструкция подушки из ППМ аналогична конструкции флюсовой подушки. Подготовка кромок упрощается, выводные планки заменяются слоем крупки в начале и в конце шва. Зачистка корня шва не производится. Применение подушки из ППМ эффективно для сварки односторонних стыковых соединений, у которых производится механическая обработка корня шва. Подушка из ППМ может быть применена для ручной и полуавтоматической сварки в  $CO_2$ , при сварке корневого шва в местах с повышенным зазором.



## Тема 5. Сварка в защитных газах

### *Учебные вопросы*

1. Сущность, преимущества и недостатки способов сварки в защитных газах.
2. Разновидности способов сварки в защитных газах.
3. Сварка трехфазной дугой неплавящимися электродами в среде аргона.
4. Сварка проволокой в среде углекислого газа.

### **1. Сущность, преимущества и недостатки способов сварки в защитных газах**

Сущность способов электродуговой сварки в среде защитных газов заключается в том, что сварочная дуга горит в пространстве, защищенном от воздействия атмосферы оболочкой из инертного или активного газа. При этом также осуществляется защита потоком газа расплавленного металла сварочной ванны. Как правило, газ исполняет роль только защитной среды. Причем в инертных газах можно осуществлять сварку как плавящимся (проволокой), так и неплавящимся (вольфрамовым) электродом, а в активных — только плавящимся электродом и иногда графитовым электродом.

К основным преимуществам сварки в среде защитных газов относятся:

- 1) возможность сварки металлов и сплавов толщиной от десятых долей миллиметра до десятков миллиметров;
- 2) высокая степень концентрации тепловой энергии источника тепла, что приводит к снижению степени коробления изделия при сварке;
- 3) получение швов высокого качества при сварке нержавеющей и жаропрочных сталей, цветных металлов и легких сплавов;
- 4) высокая производительность процесса за счет легкости автоматизации и механизации сварочных работ;
- 5) возможность наблюдения за дугой;
- 6) отсутствие необходимости применения флюсов и обмазок, а следовательно и очистки швов от шлаковой корки;
- 7) низкая себестоимость сварных соединений при использовании в качестве защитного газа  $\text{CO}_2$  или паров воды.

У сварки в среде защитных газов есть и некоторые недостатки:

- 1) интенсивное разбрызгивание металла, что приводит к засорению сопла сварочной горелки и свариваемых деталей, а также увеличивает расход присадочного материала;
- 2) высокая стоимость инертных защитных газов;
- 3) необходимость применения источников питания постоянного тока при использовании плавящегося электрода;
- 4) необходимость защиты глаз сварщика от светового излучения дуги.

## 2. Разновидности способов сварки в защитных газах

### *Атомно-водородная сварка*

Сущность способа заключается в том, что в столбе дуги происходит диссоциация молекул водорода на атомы, сопровождающаяся поглощением тепла дуги в количестве 100600 кал/моль (рис. 2.19). На поверхности металла происходит обратная реакция с выделением тепла. При данном способе сварки плавление металла происходит в основном за счет передачи тепла дуги через промежуточные процессы диссоциации и образования молекул водорода.

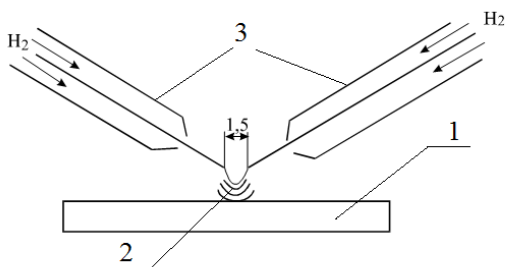


Рис. 2.19. Схема процесса атомно-водородной сварки:  
1 – изделие; 2 – межэлектродная дуга; 3 – сопла горелки

Кроме передачи тепла и защиты дуги водород оказывает и металлургическое воздействие на жидкий металл сварочной ванны. Атомный водород хорошо восстанавливает окислы почти всех металлов, реагируя с кислородом, предупреждая азотирование и окисление металла. В случае сварки металла в смеси водорода и азота последний не оказывает вредного воздействия на жидкий

металл, так как атомарный водород легко разрушает соединения азота. Водород обладает высоким потенциалом ионизации и высокой теплопроводностью, поэтому рабочее напряжение (на дуге) обычно составляет 60...100 В.

Дуга, в зависимости от ее мощности, расхода газа и расстояния между электродами, может иметь различную форму. При большой мощности, большом расходе газа и большом расстоянии между электродами (4...5 мм) дуга имеет петлеобразную форму с большим ореолом пламени, окружающего столб дуги. В этом случае горение дуги сопровождается резким звенящим звуком (так называемая «звенящая» дуга). При малой мощности дуги, небольшом расстоянии между электродами 0,5...1,5 мм, небольшом расходе газа 6...10 л/мин величина петли столба дуги и ореол уменьшаются, дуга горит бесшумно («спокойная» дуга). «Спокойная» дуга применяется для сварки очень тонкого металла, во всех остальных случаях применяется «звенящая» дуга. С помощью атомно-водородной сварки легко свариваются углеродистые, низколегированные и высоколегированные стали, нержавеющие стали и сплавы с получением качественных сварных соединений толщиной от 0,5 мм и выше.

Недостатками атомно-водородной сварки являются низкая производительность при сварке металла большой толщины, сложность аппаратуры, взрывоопасность водорода и необходимость применения источника питания с большим напряжением холостого хода. Кроме того, в сварных швах наблюдаются газовые поры и много растворенного водорода.

#### ***Аргонодуговая сварка неплавящимся электродом***

Это наиболее эффективный способ для сварки любых конструкционных материалов, поскольку защитной средой является инертный газ. Толщина свариваемого материала может изменяться от десятых долей миллиметра до десятков миллиметров. Процесс выполняется в ручном, полуавтоматическом и автоматическом режимах. В качестве неплавящегося электрода (НЭ) используются вольфрамовые стержни с активизирующими добавками окислов иттрия или лантана (рис. 2.20).

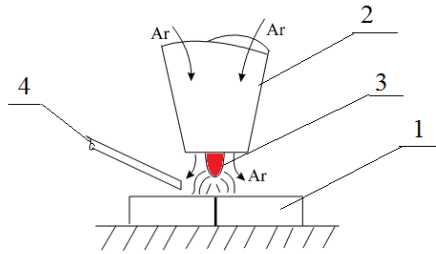


Рис. 2.20. Схема аргодуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом: 1 – изделие; 2 – сопло горелки; 3 – вольфрамовый электрод; 4 – присадочный материал

Аргодуговая сварка НЭ черных и цветных сплавов выполняется на постоянном токе прямой полярности. Сварка легких сплавов осуществляется на переменном токе. Зажигание дуги с вольфрамового электрода на изделие при автоматической сварке осуществляется с помощью осциллятора или замыканием дугового промежутка графитовой пластиной. При ручной сварке зажигание дуги осуществляется касанием электрода на угольный или графитовый брусок с последующим переносом дуги к месту сварки.

### ***Шланговая полуавтоматическая сварка вольфрамовым электродом***

Сущность способа заключается в том, что сварочная горелка в процессе перемещения опирается на присадочную проволоку, автоматически подающуюся в зону дуги и обеспечивающую в то же время постоянство длины дуги. Присадочная проволока, непрерывно опираясь на кромки свариваемого изделия, придает сварочной горелке движение в сторону, противоположную движению проволоки, облегчая работу сварщика. Преимущества по сравнению с ручной дуговой сваркой состоят в повышении производительности в 3...5 раз, хорошем качестве сварных швов, меньшей степени зависимости качества шва от квалификации сварщика.

### ***Сварка в камере с контролируемой атмосферой***

Разновидность способа сварки в защитных газах – сварка в камере с контролируемой атмосферой (рис. 2.21). Сварка производится в камере, где сначала создается вакуум, затем камера заполняется

аргоном (контролируемой атмосферой). В этом случае обеспечивается более полная защита сварочной ванны. Способ применяется при дуговой сварке неплавящимся электродом специальных легко окисляющихся металлов и сплавов автоматической сваркой, механизированной или вручную. При механизированной сварке или при сварке вручную сварщик находится вне камеры и продевает руку через специальный, заканчивающийся перчаткой рукав в стенке камеры.

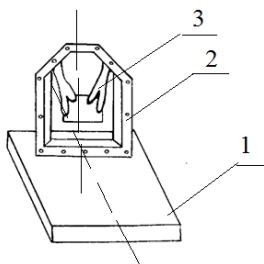


Рис. 2.21. Схема сварки в камере с контролируемой атмосферой:  
1 – основание камеры; 2 – вакуумная камера; 3 – резиновые рукава

### *Дуговая сварка в среде гелия*

Способ применяется в тех же случаях, что и аргонодуговая сварка. Оборудование для сварки, приемы и техника выполнения сварных швов аналогичны способу сварки в среде аргона. Особенности сварки в гелии:

- 1) гелий легче аргона, и его расход при сварке на 80...100 % больше, чем расход аргона;
- 2) напряжение на дуге в гелии в 2 раза выше напряжения на дуге в аргоне, поэтому тепловая мощность дуги в среде гелия при одинаковых значениях тока сварки больше, чем мощность дуги в среде аргона;
- 3) изменение длины дуги в среде гелия значительно больше отражается на изменении размеров сварного шва.

В связи с более высокой мощностью дуги, горящей в среде гелия, ее желательно применять для сварки металлов и сплавов с высокой теплопроводностью, например, для сварки латуни, меди, бронзы, алюминия. При этом необходимо учитывать тот факт, что стоимость гелия значительно выше, чем стоимость аргона.

### ***Сварка погруженной дугой вольфрамовым электродом в аргоне***

Способ (рис. 2.22) применяется при повышенном диаметре электрода и высокой силе тока. Свариваются соединения встык, без разделки кромок, без зазора. Подача защитного газа повышена (40...50 л/мин), дуга обжимается газом, что повышает ее температуру.

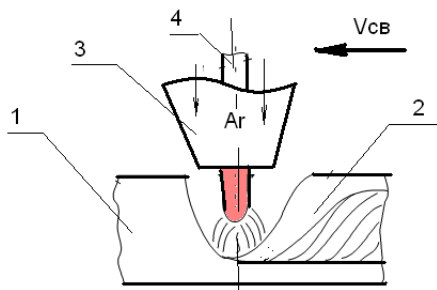


Рис. 2.22. Схема процесса сварки металла погруженной дугой:  
1 – изделие; 2 – сварочная ванна; 3 – сопло горелки;  
4 – вольфрамовый электрод

Проходящий через дугу газ, нагреваясь, увеличивает свой объем и приобретает свойства плазмы. Давление газа и дуги способствует углублению ее в основной металл, дуга горит в образовавшейся в металле полости, что позволяет опустить электрод так, что дуга горит ниже поверхности металла. Таким образом сваривают титан, алюминий, высоколегированные стали толщиной до 36 мм.

### ***Импульсно-дуговая сварка вольфрамовым электродом в аргоне***

Автоматическая сварка конструкций из стали толщиной менее 0,6 мм представляет значительные трудности. Основными дефектами сварки сталей такой толщины являются прожоги вследствие неточной подгонки и сборки соединения и коробления кромок. Некоторое снижение коробления и улучшение качества сборки под сварку достигается путем усовершенствования прижимных приспособлений. Однако этого бывает недостаточно для получения качественных швов.

Трудности сварки тонколистовых материалов в значительной степени устраняются при применении сварки импульсной дугой. Сущность способа заключается в том, что плавление металла осу-

ществляется дугой, горящей периодическими отдельными импульсами с определенными интервалами во времени. Сплошной шов получается путем расплавления отдельных точек с заданным перекрытием предыдущей точки.

Сварка выполняется на медной подкладке с продольной канавкой глубиной 0,15...0,2 мм и шириной 1,8...2,0 мм в пневмошланговых прижимных приспособлениях клавишного типа. Вольфрамовый электрод диаметром 1 мм затачивается на конус под углом 30...40°. Швы не имеют усиления.

### *Сварка трехфазной дугой неплавящимися электродами в среде аргона*

Трехфазная сварочная дуга, горящая в среде аргона с неплавящимися электродами, представляет собой высокотемпературный энергетический объект, в котором горят три отдельные дуги переменного тока. Образование дугового разряда обеспечивает электрическая схема трехфазного источника питания, позволяющая подключать две фазы соответственно к двум электродам, а третью фазу к изделию. С целью расширения технологических возможностей дуги схема питания трехфазной дуги асимметрична, строится по схеме «открытый треугольник». Две дуги, горящие между электродами и изделием, называют основными или зависимыми, а третью — межэлектродной или независимой. В каждый момент времени в трехфазном факеле горят хотя бы две дуги: W-Al и W-W или W-Al и W-Al, что определяет высокую устойчивость этой системы в пространстве и времени (рис. 2.23). Для поддержания устойчивого горения трехфазной дуги межэлектродное расстояние обычно устанавливают равным диаметру электродов.

Изучению энергетических тепловых и силовых параметров трехфазной дуги, горящей в среде аргона с НЭ, уделено большое внимание в работах ученых Тольяттинского политехнического института (ныне ТГУ) В.И. Столбова, Г.М. Коротковой, Р.А. Цепенева, В.А. Шаповалова, В.В. Ельцова, В.П. Потехина, К.В. Моторина. Тепловые и силовые характеристики трехфазного процесса сварки неплавящимися электродами достаточно подробно изложены в работах В.И. Столбова и В.П. Потехина. По данным этих авторов,

тепловой поток от трехфазной дуги, горящей в среде аргона с неплавящихся электродов, имеет две четко выраженные области:

- 1) струя разогретого дугой газа, движущаяся соосно электродам (газокинетическая составляющая);
- 2) поток заряженных частиц, создающий на поверхности металла так называемое активное пятно дуги (электродинамическая составляющая), которое может отставать на некоторое расстояние от оси горелки при ее движении (рис. 2.24).

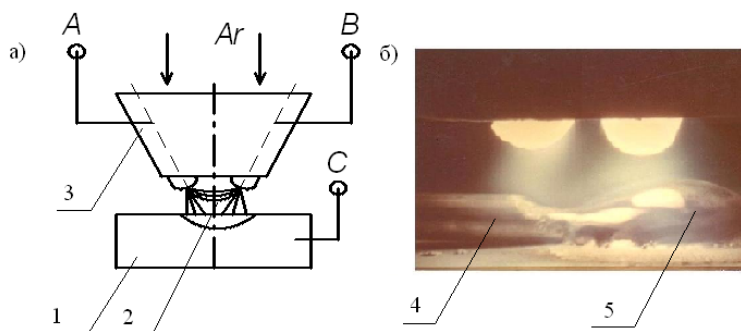


Рис. 2.23. Процесс горения трехфазной дуги в среде аргона с неплавящихся электродов: *а* – схема горения трехфазной дуги (*1* – изделие; *2* – факел трехфазной дуги; *3* – сварочная горелка); *б* – реальный процесс (*4* – присадочный пруток; *5* – сварной шов)

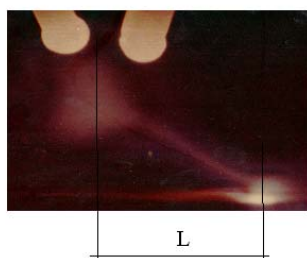


Рис. 2.24. Активное пятно трехфазной дуги. *L* – расстояние между осями газового потока и активного пятна

Причем установлено, что мощность каждой из составляющих теплового потока примерно одинакова, хотя плотность энергии в активном пятне на порядок выше, чем в потоке нагретого газа.



Формирование сварочной ванны и сварного соединения в целом в значительной степени зависит от теплового и силового воздействия дуги на сварочную ванну и характера гидродинамических процессов в расплавленном металле.

Особенностью сварки трехфазной дугой является то, что распределение тока в электродах и изделии подчиняется определенному закону и выражается зависимостью

$$K_T = I_{\text{изд}} / I_{\text{элек}} \approx 1,73,$$

где  $K_T$  — коэффициент токов;  $I_{\text{изд}}$  — ток в изделии;  $I_{\text{элек}}$  — ток в каждом электроде.

Поэтому сила тока, протекающего через изделие, в 1,73 раза больше, чем сила тока в каждом из электродов. Таким образом, сравнивая мощности однофазной и трехфазной дуги при одинаковых значениях токов, можно сказать, что мощность трехфазной дуги значительно выше, чем у однофазной. Приращение мощности можно объяснить наличием межэлектродной дуги в трехфазном факеле. Кроме приращения общей мощности межэлектродная дуга позволяет существенно расширить технологические возможности трехфазной дуги, а именно:

- поддерживает в ионизированном состоянии дуговой промежуток между изделием и электродами при отключении фазы «изделие»;
- позволяет подогреть деталь.

Такой способ сварки разработан для сварки легких сплавов толщиной 0,5...40 мм. Преимуществами сварки трехфазной дугой неплавящимся электродом в среде аргона являются:

1) более высокая мощность и проплавляющая способность по сравнению с однофазной дугой;

2) высокая стабильность горения дуги, близкая к стабильности горения дуги постоянного тока. Для сварки не требуется специальных стабилизаторов дуги;

3) более интенсивное катодное распыление окисной пленки, что обеспечивает высокое качество шва;

4) широкие технологические возможности сварки, а именно:

а) возможность использовать сварочную горелку как инструмент для сварки и подогрева металла;

- б) возможность сварки независимой дугой тонколистового металла или фольги (кроме сплавов алюминия и магния);
- в) высокая стойкость электродов из-за перераспределения тока в фазе «электрод» и в фазе «изделие».

Проплавляющая способность трехфазной дуги в значительной степени зависит также от взаимного расположения активного пятна дуги и оси газокинетического потока в пределах сварочной ванны. При традиционном способе сварки активное пятно, воздействуя на сварочную ванну, способствует увеличению глубины проплавления основного металла. Особенно это заметно при сварке без применения присадочной проволоки.

При наплавочных работах, когда требуется минимальная глубина проплавления основного металла, такое явление негативно влияет на качество наплавки.

Искусственное дифференцирование теплового потока трехфазной дуги с целью выведения наиболее концентрированной его части – активного пятна – за пределы сварочной ванны может существенно снизить термическое и силовое воздействие дуги на основной металл. Практическая реализация разделения теплового потока трехфазной дуги без нарушения устойчивости ее горения была осуществлена за счет параллельного с изделием подключения присадочной проволоки к средней фазе трехфазного источника питания (ИП). При подключении присадки к фазе ИП активное пятно воздействует уже не на ванну, а на проволоку, активно расплавляя ее, но не увеличивая глубину проплавления металла, что очень важно для наплавки (рис. 2.25).

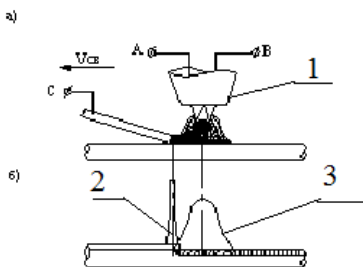


Рис. 2.25. Схема воздействия трехфазной дуги на поверхность металла: а — физическая модель; б — математическая модель; 1 — сварочная горелка; 2 — распределение теплового потока активного пятна; 3 — тепловой поток газокинетической составляющей

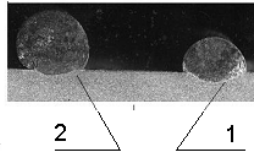


Рис. 2.26. Форма валиков, наплавленных трехфазной дугой:  
1 – традиционная наплавка; 2 – с подключенной к ИП проволокой

Эксперименты показали, что такая схема включения при одинаковой мощности дуги позволяет практически в два раза снизить глубину провара основного металла и увеличить высоту наплавленного слоя за один проход (рис. 2.26).

### *Сварка плавящимся электродом в среде аргона*

Сварка плавящимся электродом отличается высокой производительностью и может выполняться механизированным и автоматическим способами. Аргонодуговая сварка плавящимся электродом применяется при сварке нержавеющей жаропрочных сталей, легких и цветных металлов толщиной более 3 мм. Использование аргонодуговой сварки для углеродистых и низколегированных сталей неэкономично.

Качество сварных соединений в значительной степени зависит от стабильности горения дуги и характера переноса электродного металла через дуговой промежуток. При аргонодуговой сварке плавящимся электродом могут иметь место два вида переноса электродного металла: крупнокапельный и струйный.

Характер переноса зависит от величины тока. Сварка на малых токах характеризуется крупнокапельным переносом, значительным разбрызгиванием и окислением металла. Форма провара обычная. При увеличении сварочного тока перенос металла становится мелкокапельным или струйным. Электродный металл как бы стекает с электрода непрерывным потоком мелких капель. Разбрызгивание и окисление электродного металла невелико. Форма провара с резким увеличением глубины провара в середине шва. Величина критического тока зависит от диаметра и материала электрода, полярности и состава защитного газа. Например, сварка проволокой Св-1Х18Н9Т в среде чистого аргона выполняется на следующих режимах:

|                       |           |           |     |     |
|-----------------------|-----------|-----------|-----|-----|
| диаметр электрода, мм | 1,0       | 1,6       | 2,0 | 2,5 |
| критический ток, А    | 195...200 | 240...250 | 280 | 320 |

При сварке плавящимся электродом расплавляемый электродный металл при переходе с электрода в ванну значительное время находится в дуге в зоне высоких температур. При этом происходит более интенсивное окисление элементов, чем при сварке неплавящимся электродом. Это положение необходимо учитывать при выборе защитного газа и электродной проволоки. Газ и электродная проволока выбираются в зависимости от марки сварочного материала, а также от требований, предъявляемых к механическим и коррозионным свойствам сварного соединения.

#### **4. Сварка проволокой в среде углекислого газа**

Метод электродуговой сварки металлической проволокой в среде углекислого газа разработан профессором К.В. Любавским. Этот метод дал возможность получать плотные швы при сварке малоуглеродистой, среднеуглеродистой и низколегированной стали.

Сущность способа заключается в том, что воздух оттесняется от зоны сварки струей углекислого газа, а окисление самим углекислым газом расплавленного дугой металла сварочной ванны компенсируется за счет повышенного содержания элементов-раскислителей (марганца и кремния) в электродной проволоке.

На качество сварных соединений существенное влияние, особенно при механизированной сварке, оказывает техника сварки. От расстояния, угла наклона и характера движения горелки относительно свариваемых деталей зависят надежность газовой защиты зоны сварки от воздуха, скорость охлаждения металла, форма шва, условия удаления газовых пузырей и неметаллических включений из сварочной ванны. Процесс сварки 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, так как увеличение длины дуги повышает разбрызгивание жидкого металла и угар легирующих элементов. Обычно сварка выполняется на постоянном токе обратной полярности.

Для сварки плавящимся электродом в среде углекислого газа используются полуавтоматы и автоматы, причем для механизиро-

ванной сварки используются полуавтоматы типа ПДГ-508, СВАП, Мидиком-160, ПДШ-500, ПШ-54.

Сварка может производиться во всех пространственных положениях. Для сварки малоуглеродистой и низколегированной стали обычно пользуются электродной проволокой марки Св-08Г2С диаметром 0,8...1,2 мм. Применяют постоянный ток обратной полярности силой от 100 до 250 А. Напряжение дуги при этом составляет 18...22 В.

## **Тема 6. Электрошлаковая сварка**

### *Учебные вопросы*

1. Сущность способа электрошлаковой сварки (ЭШС).
2. Технологические преимущества ЭШС.
3. Разновидности ЭШС в зависимости от типа электрода.
4. Особые случаи применения электрошлакового процесса.
5. Влияние режима ЭШС на форму и размеры шва.

### **1. Сущность способа электрошлаковой сварки (ЭШС)**

Способ разработан в 1947–1949 годах в Институте электросварки им. Е.О. Патона. В основу положен принцип искусственного охлаждения свободной поверхности сварочной ванны с применением формирующих устройств (водоохлаждаемых ползунов). За внедрение способа ЭШС группа ученых Института электросварки получила Государственную премию СССР. Способ нашел широкое применение в тяжелом, энергетическом, транспортном машиностроении, применяется для сварки различных деталей тепловых котлов и мощных прессов, лопастей турбин и др. деталей толщиной от 16 мм. Электрошлаковая сварка получила широкое распространение за рубежом: в США, Германии, Японии.

Электрошлаковая сварка – процесс образования неразъемных соединений, при котором плавление основного и присадочного металлов осуществляется за счет тепла, выделяемого при прохождении электрического тока через слой расплавленного флюса. Слой флюса служит защитой от вредного воздействия окружающей среды и одновременно является средством металлургического воздействия на расплавленный металл (рис. 2.27).

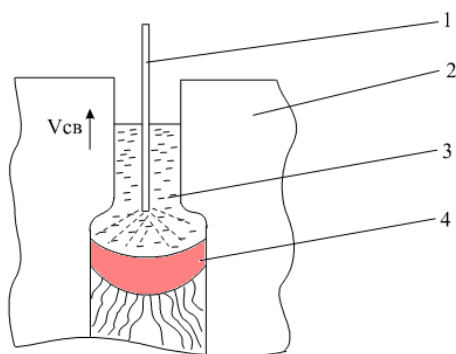


Рис. 2.27. Схема электрошлакового процесса: 1 – электрод; 2 – изделие; 3 – шлаковая ванна; 4 – металлическая ванна

Сварка производится электродом, совмещенным с осью шва. Плавление основного и присадочного металла происходит в замкнутой плоскости, образуемой кромками свариваемых листов и формирующими устройствами (рис. 2.28).

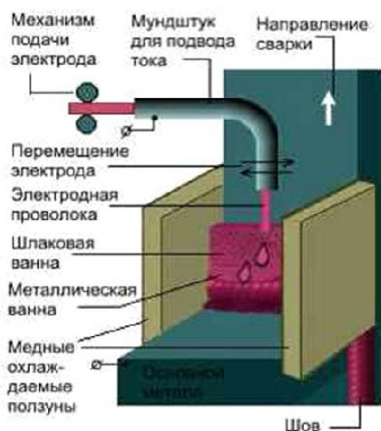


Рис. 2.28. Схема процесса электрошлаковой сварки

При ЭШС допускается повышенная влажность изделий и флюса, наличие ржавчины на кромках детали. Высокое качество сварных швов достигается за счет того, что поверхность сварочной ванны во время процесса сварки находится в расплавленном состоянии, и поэтому создаются благоприятные условия полного удаления газов

и заполнения жидким металлом пустот, образующихся в процессе сварки. Сварка характеризуется двумя стадиями: 1) электродуговой процесс; 2) шлаковый процесс. Начальный момент ЭШС характеризуется электродуговым процессом между проволокой и дном технологического «кармана» и служит для расплавления флюса. Расплавляясь, флюс образует шлаковую ванну, и процесс переходит в бездуговой (шлаковый) режим, а расплавленная шлаковая ванна становится жидким проводником тепла. Подача проволоки в зону сварного соединения осуществляется специальными аппаратами с электроприводом и возможностью поперечного перемещения проволоки в пределах сварочной ванны.

## 2. Технологические преимущества ЭШС

Использование ЭШС повышает производительность в 1,5... 3 раза по сравнению с автоматической сваркой под слоем флюса. Это достигается за счет:

- 1) возможности сварки металла любой толщины за один проход;
- 2) увеличения количества наплавленного металла за единицу времени из-за увеличения плотности тока, проходящего через электродную проволоку. Коэффициент наплавки при ЭШС составляет  $\alpha_n = 18...22 \text{ г/А}\cdot\text{ч}$ , против  $14...18 \text{ г/А}\cdot\text{ч}$  при автоматической сварке;
- 3) уменьшения количества электродного металла, необходимого для образования шва при сварке металла толщиной более 90 мм. Площадь сечения зазора в этом случае меньше площади сечения разделки, необходимой для полного провара при автоматической сварке под флюсом.

Кроме того, использование ЭШС повышает качество сварного соединения, уменьшая вероятность образования:

- 1) пор в сварном шве, что обуславливается медленным затвердеванием сварочной ванны, при котором создаются благоприятные условия для выделения газа из кристаллизующегося металла;
- 2) кристаллизационных трещин.

Для ЭШС характерны особенности первичной кристаллизации, зависящие от химического состава, толщины металла и режима сварки. Различают четыре вида строения первичной структуры шва, у которых макроструктура шва имеет:

1) две кристаллизационные зоны: а) зону крупных столбчатых кристаллов, которые растут в направлении, противоположном отводу тепла; б) зону тонких столбчатых кристаллов. В зависимости от формы ванны растущие кристаллиты встречаются в средней части шва под разным углом;

2) три зоны: а) зону равноосных кристаллитов; б) зону тонких кристаллитов; в) зону крупных кристаллитов (рис. 2.29). Наличие первой зоны связано с замедленным охлаждением средней части шва и чаще всего наблюдается при сварке сталей с содержанием углерода более 0,35 %;

3) одну зону крупных столбчатых кристаллитов, растущих в осевом направлении, что предопределяет высокую стойкость швов против образования трещин;

4) одну зону тонких столбчатых кристаллов, растущих в осевом направлении. Такая структура характерна для сварки деталей малого сечения и тоже предопределяет высокую стойкость швов против образования трещин. Снижение процента углерода в металле шва также способствует получению структуры швов 4-го типа.

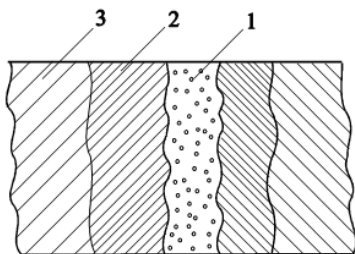


Рис. 2.29. Макроструктура шва при ЭШС: 1 – зона равноосных кристаллитов; 2 – зона тонких столбчатых кристаллитов; 3 – зона крупных столбчатых кристаллитов

Для измельчения первичной структуры сварных швов применяются:

- 1) специальная нормализация ( $900^{\circ}$ ) и высокий отпуск  $650^{\circ}$ ;
- 2) электроды-модификаторы;
- 3) ультразвуковая и механическая вибрация сварочной ванны.



Форма металлической ванны при ЭШС определяется рядом факторов. Основными из них являются:

- 1) скорость подачи электродной проволоки;
- 2) толщина металла, приходящаяся на один электрод.

Для обеспечения высокой стойкости металла шва к образованию кристаллизации должна снижаться скорость подачи проволоки или уменьшаться количество электродов.

Благодаря особенностям термического цикла ЭШС процесс протекает в условиях предварительного и сопутствующего подогрева. Он характеризуется медленным охлаждением, что является эффективным средством повышения стойкости против трещин и позволяет сваривать закаливающиеся стали с содержанием углерода 0,40...0,45 % без предварительного подогрева изделия.

Кроме того, к техническим преимуществам ЭШС следует отнести:

– отсутствие угловых деформаций свариваемого изделия, являющееся результатом симметричности разделки и одновременного наложения шва по всей толщине металла;

– снижение себестоимости сварного соединения, которое достигается за счет:

- а) снижения расхода флюса в 15...20 раз;
- б) упрощения подготовки кромок;
- в) экономии электроэнергии в 1,5...2 раза;
- г) возможности создания швов с усилением 1...1,5 мм независимо от толщины свариваемого металла.

### **3. Разновидности ЭШС в зависимости от типа электрода**

#### *Сварка электродными проволоками*

Этот способ получил наибольшее распространение. Сварка выполняется одной или несколькими подвижными или неподвижными проволоками. При сварке металла толщиной 50...70 мм сварка ведется одной неподвижной проволокой. При толщине металла свыше 50...70 мм сварку можно вести:

1) одной проволокой с возвратно-поступательным движением в поперечном направлении;

2) несколькими проволоками с неподвижной осью, расположенными на расстоянии до 75 мм друг от друга;

3) меньшим количеством проволок с колебательными движениями в направлении толщины свариваемых листов из расчета 150...200 мм толщины металла на 1 электрод.

При сварке различают сварочные и сборочные зазоры. Сборочный зазор неодинаков по длине и задается в зависимости от характера деформации при сварке. Сборочный зазор в нижней части равен сварочному, в верхней части зазор увеличен на 5 мм на каждый метр длины стыка.

Сварка кольцевых швов отличается от прямолинейных:

- 1) наличием устройств для формирования обратного валика (медное охлаждаемое кольцо, приваривающееся стальное кольцо, обратный ползун);
- 2) необходимостью замыкания конца шва с началом.

Процесс сварки начинается ниже уровня оси обечайки. Сначала делается технологический «карман», затем разводится шлаковая ванна, и с помощью вертикального перемещения аппарата ванна доводится до уровня горизонтальной оси кольцевого стыка. После этого начинают вращать изделие и заваривать кольцевой шов (рис. 2.30).

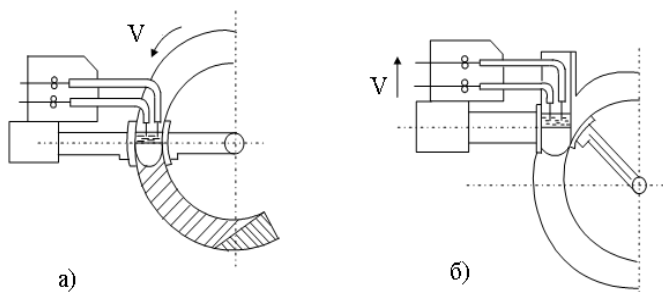


Рис. 2.30. Схема процесса электрошлаковой сварки кольцевого стыка:  
а – начало процесса; б – окончание шва

#### ***Сварка электродами большого сечения***

Применяется при сварке металла толщиной до 400 мм с длиной стыка до 1000 мм. Зазор между кромками 30...35 мм. Electroды изготавливаются в виде пластины из листовой стали шириной 8...12 мм в зависимости от толщины свариваемого изделия. Сварку металла толщиной 100...150 мм ведут одним электродом, при большей толщине – двумя-тремя электродами.

Преимуществами такого способа являются равномерный нагрев шлаковой ванны, высокая устойчивость процесса, возможность работы на малой плотности тока ( $0,5 \dots 0,6 \text{ А/мм}^2$ ) и пониженном напряжении ( $20 \dots 40 \text{ В}$ ).

### **Сварка плавящимся мундштуком**

Плавящийся мундштук – устройство для направления электрода и подвода к нему тока (рис. 2.31). Он представляет собой совокупность способов сварки проволоками и пластинами. Применяется для сварки толстолистого материала большой длины и для сварки стыков сложного профиля.

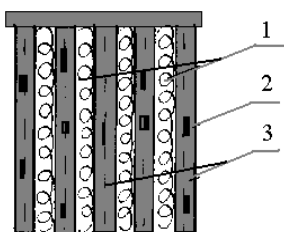


Рис. 2.31. Схема плавящегося мундштука: 1 – спираль из проволоки; 2 – изолирующие накладки; 3 – стальные пластины

Сечение мундштука составляет  $10 \dots 50 \%$  от сечения сварочного зазора. Расстояние между электродными пластинами  $70 \dots 100 \text{ мм}$ . Максимальная толщина металла, провариваемая плавящимся мундштуком с несколькими электродами, определяется как  $\delta = 70n - 30$ , где  $n$  – число электродов.

Формирование шва осуществляется медными водоохлаждаемыми подкладками. Для предотвращения замыкания на свариваемые кромки металла мундштук изолируется по бокам стеклотканью. В образовании сварного шва участвуют и электродная проволока, и стальные электродные пластины.

## **4. Особые случаи применения электрошлакового процесса**

Электрошлаковый переплав металла применяется для получения легированных сталей и сплавов особо высокого качества (ШХ15, 1Х18Н9), быстрорежущей стали и т. д. (рис. 2.32).

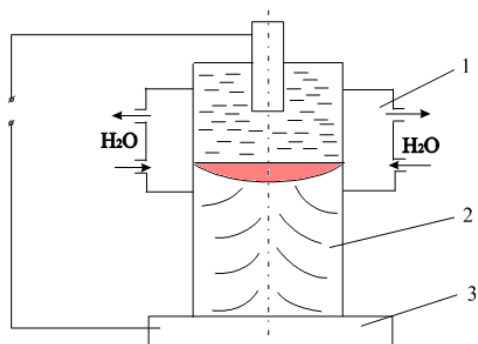


Рис. 2.32. Схема электрошлакового переплава:  
1 – водоохлаждаемый ползун; 2 – слиток; 3 – поддон

Отливка производится в медный водоохлаждаемый кристаллизатор. Материалом электрода служит подлежащий переплавке металл в виде отливки, поковки или брикета  $d = 200...300$  мм. Слитки получают весом 12...15 т.

В результате электрошлакового переплава повышается пластичность металла, ковкость, снижается хладноломкость, металл лучше сваривается из-за высокой чистоты, отсутствуют неметаллические включения, трещины. Эти высокие качества достигаются за счет:

- 1) осевой направленности роста кристаллитов, определяющей повышенную стойкость против трещин, пористости, рыхлот и т. д.;
- 2) наличия жидкой шлаковой ванны, играющей роль «тепловой надставки» и обеспечивающей благоприятные условия для удаления из шва газов и неметаллических включений;
- 3) применения специальных флюсов, снижающих содержание серы и растворяющих неметаллические включения.

#### *Электрошлаковая подпитка слитков*

Для экономии жидкой стали при изготовлении крупных отливок применяется способ обогрева верхней части слитка с помощью электрошлакового (ЭШ) процесса (рис. 2.33). В шлакоудерживающем приспособлении на поверхности залитого металла наводится шлаковая ванна глубиной 60...80 мм.

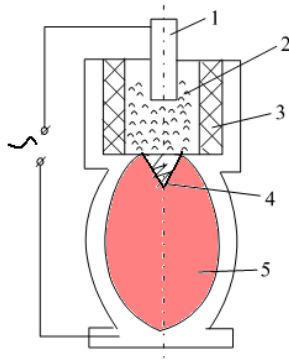


Рис. 2.33. Схема процесса ЭШ подпитки слитков: 1 – электрод; 2 – шлак; 3 – формирующее кольцо; 4 – усадочная раковина; 5 – слиток

Ток, проходя через шлаковую ванну, разогревает ее до температуры, превышающей температуру плавления металла. За счет этой теплоты осуществляется подогрев верхней застывающей части отливки, чем создаются благоприятные условия для кристаллизации металла без усадочных раковин. Расходуемый электрод подается в шлаковую ванну, пополняя верхнюю часть кристаллизующейся отливки, что способствует однородности отливки и устранению усадочной раковины.

### ***Сварочные материалы для ЭШС. Флюсы***

Флюс для электрошлаковой сварки должен:

- 1) обеспечить легкое и быстрое начало ЭШС и поддерживать его устойчивое прохождение;
- 2) обеспечивать удовлетворительное формирование поверхности шва без подрезов и наплывов, не отжимать ползуны и не вытекать в зазор между ползунами и кромками;
- 3) давать легко отделяемый шлак;
- 4) иметь высокую температуру кипения.

По химическому составу все флюсы могут быть разбиты на следующие группы:

- 1) высококремнистые марганцевые (ФЦ-7);
- 2) низкокремнистые марганцевые (АН-8, АН-22);
- 3) бескремнистые окисные (48-ОФ-6, АН-25);
- 4) фторидные (АНФ-1, АНФ-6, АНФ-22).

Устойчивость ЭШ процесса возрастает с повышением электропроводности флюса. Наибольшая устойчивость наблюдается при использовании флюса АНФ-1, наименьшая – при ФЦ-7. Чем хуже электропроводность флюса, тем более высокого напряжения требует ЭШС. Флюс должен быть не очень короткий и тугоплавкий. Длинными считаются флюсы АН-8, короткими – АНФ-1. Наиболее низкую температуру плавления имеет флюс АН-8, наиболее тугоплавкий – флюс АНФ-1. Для начала шлакового процесса (для создания шлаковой ванны) служит флюс АН-25, обладающий электропроводностью в твердом состоянии. Флюс мало влияет на химический состав шва.

Для электрошлаковой сварки применяется проволока марок Св-08А, Св-08ГА, Св-10Г2С и т. д. диаметром 3, 4 и 5 мм.

## **5. Влияние режима ЗШС на форму и размеры шва**

Режим сварки характеризуется следующими параметрами:

- 1) силой сварочного тока, которая находится в прямой зависимости от скорости подачи электрода;
- 2) напряжением процесса;
- 3) глубиной шлаковой ванны;
- 4) сечением электрода или электродов;
- 5) величиной сварочного зазора;
- 6) скоростью поперечных перемещений электрода;
- 7) скоростью сварки;
- 8) количеством электродов и характером их перемещений;
- 9) расстоянием между электродами;
- 10) расстоянием между электродом и формирующим ползуном;
- 11) временем выдержки электрода у ползунов;
- 12) сухим вылетом электрода.

Сила сварочного тока зависит от скорости подачи электродной проволоки, но растет не пропорционально скорости подачи, а медленнее. При сварке на больших токах ширина провара с увеличением подачи проволоки уменьшается, так как снижается погонная энергия.

С повышением напряжения увеличивается количество тепла, выделяющегося в шлаковой ванне, увеличивается глубина проплава-

ления кромок. Из всех составляющих режима напряжение оказывает наибольшее влияние на глубину проплавления кромок. При низком напряжении образуются непровары кромок, при чрезмерно большом напряжении шлаковая ванна кипит и нарушается устойчивость процесса.

Глубина шлаковой ванны оказывает значительное влияние на ширину шва. Увеличение глубины шлаковой ванны приводит к уменьшению глубины проплавления свариваемых кромок и наоборот. Оптимальная глубина шлаковой ванны 40...60 мм. При глубине 70 мм образуются непровары. При глубине 30 мм нарушается устойчивость процесса, наблюдается кипение шлака, всплески, разбрызгивание.

С увеличением сечения электродов – диаметра проволоки – глубина проплавления увеличивается, повышается устойчивость электрошлакового процесса. В настоящее время применяют сварку проволокой диаметром 5 мм. Для подачи проволоки в сварочную ванну использовались роликовые и трубчатые мундштуки. Увеличение диаметра проволоки вызывает расширение провара кромок при уменьшении глубины металлической ванны, что ведет к увеличению коэффициента формы шва и повышению стойкости сварного соединения против образования кристаллизационных трещин.

При увеличении скорости поперечных перемещений  $V_{\text{пн}}$  электрода ширина проплавления кромок уменьшается. Для обеспечения надежного провара  $V_{\text{пн}} = 30...40$  м/час.

Зазор между свариваемыми кромками оказывает большое влияние на ширину провара. Уменьшение зазора вызывает заметное снижение ширины провара, ухудшается устойчивость процесса, затрудняется введение мундштуков в зазор. Увеличение зазора способствует устойчивости электрошлакового процесса, позволяет получить провар большой глубины, но снижается производительность. Оптимальный зазор составляет 25...30 мм независимо от толщины свариваемых изделий.

### Вопросы для самоконтроля

1. Какие параметры режима сварки являются основными для ручной дуговой сварки металла покрытым электродом?
2. Перечислите высокопроизводительные способы ручной дуговой сварки.
3. Влияние параметров режима сварки на форму и размеры сварного шва.
4. Сущность и разновидности автоматической сварки под слоем флюса.
5. Преимущества автоматической сварки под слоем флюса.
6. Принцип действия флюсовой подушки при сварке односторонних стыковых швов.
7. Способы полуавтоматической сварки металла под слоем флюса.
8. Особенности сварки стыковых швов автоматической сваркой под слоем флюса с подачей порошкового присадочного материала на вылет электрода.
9. Преимущества и недостатки способов сварки в среде защитных газов.
10. Особенности сварки трехфазной дугой неплавящимися электродами в среде аргона.
11. Технологические преимущества способа сварки трехфазной дугой.
12. Разновидности способов сварки в среде защитных газов.
13. За счет чего происходит плавление основного и присадочного металла при электрошлаковой сварке?
14. Преимущества и недостатки способа электрошлаковой сварки металлов.
15. Особые случаи применения электрошлакового процесса.
16. Влияние параметров режима ЭШС на размеры провара кромок металла.



## Модуль 3

# ГАЗОПЛАМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

## Тема 7. Газокислородная сварка стали

### *Учебные вопросы*

1. Общие сведения о газопламенной обработке металлов.
2. Газовая сварка малоуглеродистой стали.
3. Технология сварки среднеуглеродистой и высокоуглеродистой стали.
4. Сварка легированной стали.
5. Сварка высоколегированной и инструментальной стали.

### **1. Общие сведения о газопламенной обработке металлов**

Для газопламенной обработки металлов применяют различные горючие газы и жидкости. При их сжигании в смеси с воздухом температура пламени обычно не превышает 1800...2000 °С. При газовой сварке большинства металлов требуется, чтобы температура газосварочного пламени была не ниже 3000 °С. Для повышения температуры пламени сжигание горючих газов производится в смеси с технически чистым кислородом. При газокислородной резке кислород расходуется на окисление или сжигание металла в процессе резки, а также для образования подогревающего пламени, доводящего металл до температуры воспламенения.

В качестве горючих газов в основном используют ацетилен ( $C_2H_2$ ) и пропан ( $C_3H_8$ ). От того, какой горючий газ и в какой пропорции будет смешан с кислородом, зависят характер пламени, его температура и свойства.

Различают три вида пламени: нормальное, окислительное, науглероживающее.

*Нормальное* пламя не вызывает окисления или насыщения углеродом металла и способствует его раскислению. Пламя состоит из ядра 1, восстановительной или рабочей зоны 2 и факела 3 (рис. 3.1).

Ядро пламени — ярко светящаяся часть, состоящая из смеси кислорода с ацетиленом, начинающим гореть. Плавление металла ядром пламени недопустимо, потому что в составе ядра имеются кислород и свободный углерод, которые будут переходить в металл, окисляя его и насыщая углеродом. Восстановительная или рабочая зона представляет собой прозрачный ободок вокруг ядра и состоит из смеси продуктов частичного сгорания газа. Продукты частичного сгорания газа являются восстановителями по отношению к окислам большинства металлов. В связи с этим зона, называемая восстановительной, является и рабочей зоной. Она же обладает наивысшей температурой из всех участков пламени, и ею производят плавление металла. В факеле пламени происходит полное догорание горючего газа за счет кислорода, поступающего из воздуха. Нагревать металл при сварке факелом пламени недопустимо в связи с окислением металла, а также из-за низкой температуры факела пламени.

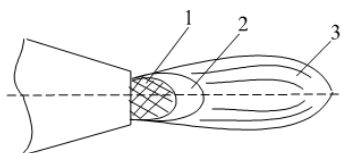


Рис. 3.1. Схема газокислородного пламени:  
1 — ядро пламени; 2 — рабочая зона; 3 — факел пламени

*Окислительное* пламя получается при избытке кислорода в смеси. Оно вызывает окисление металла. Окислительное пламя отличается укороченным ядром синеватого цвета, имеющим остроконечную форму, укороченным факелом, рабочая зона почти не заметна.

*Науглероживающее* пламя получается при избытке ацетилена в газовой смеси. При плавлении стали таким пламенем углерод из продуктов пламени переходит в металл. Науглерожженный металл обладает повышенной твердостью и хрупкостью. Пламя отличается увеличенными размерами факела и ядра. Рабочая зона размыта и практически незаметна. В технике газопламенной обработки металлов обычно применяется нормальное пламя, но иногда рекомендуется применение слегка науглероживающего или слегка окислительного пламени.

## **2. Газовая сварка малоуглеродистой стали**

Технология газовой сварки малоуглеродистой стали включает несколько операций.

### ***Подготовка кромок металла под сварку***

Кромки под сварку подготавливаются в зависимости от толщины свариваемого металла, вида соединения и метода сварки. Перед сваркой кромки должны быть очищены от всех загрязнений на ширину 4...5 мм от оси шва. Стыковые соединения металла толщиной менее 2 мм сваривают без разделки кромок или с отбортовкой кромок. При толщине металла 2...5 мм делают скос одной из кромок; при толщине металла 5...15 мм делают разделку кромок V-образной формы; при толщине металла более 15 мм ведут двустороннюю сварку с X-образной разделкой кромок.

### ***Подбор сварочной (присадочной) проволоки***

Диаметр проволоки для газовой сварки подбирается в зависимости от толщины свариваемого металла и способа сварки по следующей формуле:

- 1) для левого способа сварки  $d = \delta/2 + 1$  мм;
- 2) для правого способа сварки  $d = \delta/2$ .

Сварочная проволока выбирается в зависимости от марки свариваемого металла. Для сварки стали марок Ст3–Ст15 выбирается проволока марки Св-08 или Св-15. Для сварки стали марок Ст15–Ст25 применяется проволока Св-08А или Св-08ГА.

### ***Подбор мощности горелки (наконечника)***

Мощность наконечника горелки подбирается в зависимости от толщины свариваемых кромок и метода сварки. В общем случае расход горючего газа определяется по формуле

$$A = K \cdot \delta,$$

где  $K$  – удельный расход газа на 1 мм толщины металла (справочные данные);  $\delta$  – толщина металла в миллиметрах.

### ***Управление горелкой***

Перед зажиганием горелки при помощи редуктора устанавливается необходимое рабочее давление кислорода. Сначала немного открывается кислородный вентиль на горелке, затем – ацетилено-

вый, и конец мундштука горелки подносится к пламени. После воспламенения смеси регулируют пламя до получения пламени нормального характера, руководствуясь его внешним видом. В процессе выполнения шва горелкой производят равномерное и непрерывное поступательное и колебательное движения, при этом факел пламени всегда должен оставаться параллельным оси шва. Применяются два различных способа ручной газовой сварки: широко распространенный «левый» способ и менее распространенный «правый» способ. При «левом» способе сварка ведется справа налево (рис. 3.2, а).

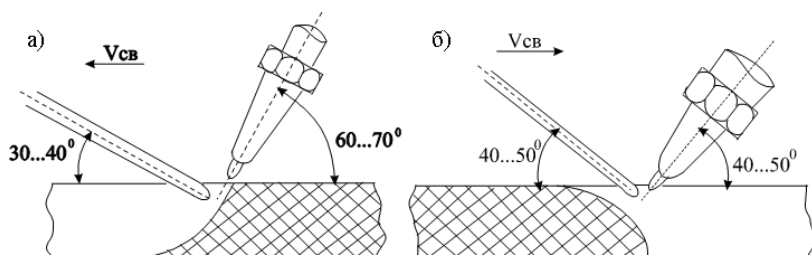


Рис. 3.2. Способы газовой сварки металла:  
а – «левый» способ; б – «правый» способ

Впереди подается пруток присадочного металла, за ним следует горелка, пламя направлено под углом к поверхности металла в сторону еще не заваренного шва.

При «правом» способе сварка ведется слева направо (рис. 3.2, б). Впереди передвигают горелку, за ней подают пруток присадочного металла. Пламя направлено назад, на уже заваренный шов. «Правый» способ целесообразен в том случае когда толщина свариваемого металла более 5 мм.

### *Подача сварочной проволоки*

Подача сварочной проволоки осуществляется под углом около  $45^\circ$ . При сварке металла толщиной свыше 1,5 мм конец сварочного прутка остается погруженным в сварочный металл во избежание окисления. При сварке металла толщиной более 5 мм сварочной проволокой производят колебательные движения в сторону, противоположную движению горелки.

Перед сваркой производится прихватка свариваемых кромок, которую выполняют от середины шва к краям. Изделия из малоуглеродистой стали после сварки последующей термообработке не подвергаются, так как ее влияние на качество малоуглеродистой стали невелико.

### **3. Технология сварки среднеуглеродистой и высокоуглеродистой стали**

#### *Основные затруднения при сварке*

1. Происходит кипение сварочной ванны.
2. Металл закаливается в зоне шва, и образуются трещины в шве и околошовной зоне (ОШЗ).

#### *Особенности сварки*

1. Мощность горелки для сварки подбирается несколько меньшая, чем при сварке малоуглеродистой стали.
2. Рекомендуется применять флюс, особенно для сварки высокоуглеродистой стали (50 %  $\text{NaHCO}_3$ , 50 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ).
3. Перед сваркой заготовки рекомендуется отжигать.
4. Сварку следует выполнять с общим предварительным подогревом изделия, не допускается перегрев и кипение сварочной ванны.
5. После сварки необходимо обеспечить максимально замедленное охлаждение сварного соединения (укрывание песком, асбестом).
6. Во всех случаях сварки средне- и высокоуглеродистой стали рекомендуется последующая термическая обработка в виде отжига, нормализации или закалки с высоким отпускком.

### **4. Сварка легированной стали**

#### *Основные затруднения*

1. Металл закаливается, и образуются трещины в шве и ОШЗ тем больше, чем больше в составе стали углерода и легирующих добавок.
2. Происходит выгорание из расплавленного металла легирующих элементов.

#### *Особенности техники сварки*

1. Необходимо постепенно нагревать металл в месте начала шва.
2. Накладывать швы необходимо с максимально возможной скоростью, не допуская перегрева металла.

3. В месте окончания шва осуществлять медленный, постепенный отвод пламени, образуя усиление в конце шва, а также обогреть увеличенную площадь металла.
4. Не допускать сварки металла при низких температурах. Обеспечивать медленное охлаждение сварного соединения.
5. Перед сваркой заготовки должны быть в отожженном состоянии.

## **5. Сварка высоколегированной и инструментальной стали**

### *Основные затруднения при сварке*

1. Образуются трещины в сварных швах вследствие сильной закаливаемости металла на воздухе.
2. Получаются швы с большой химической неоднородностью.

### *Особенности сварки*

1. Заготовки перед сваркой должны быть в отожженном состоянии и тщательно очищены.
2. Заготовки перед сваркой должны подогреваться до температуры 250...300 °С.
3. При сварке должен обязательно применяться флюс.
4. Пламя должно быть с небольшим избытком ацетилена.
5. После сварки необходимо помещать изделия в горячем состоянии в печь для отжига.

Кроме различных сталей пламенем газовой горелки можно сваривать чугун, медь, латунь, бронзу. Широкое распространение газовое пламя нашло при ремонтной сварке чугуна, для наплавки, а также для пайки различных металлов. Газовое пламя может обеспечивать процесс разъединения металлов или газокислородную резку.

## **Тема 8. Кислородная разделительная резка металлов**

### *Учебные вопросы*

1. Технология газовой резки металлов.
2. Техника газокислородной и кислородно-флюсовой резки.

### **1. Технология газовой резки металлов**

Кислородная резка основана на способности некоторых металлов сгорать в струе чистого кислорода. Режущую кислородную

струю направляют под углом  $90^\circ$  к поверхности металла, и она про-  
резает его на всю толщину (рис. 3.3). Для выполнения кислородной  
резки температура плавления:

- 1) разрезаемого металла должна быть выше температуры возгорания  
этого металла в струе кислорода;
- 2) окислов разрезаемого металла должна быть ниже температуры  
плавления самого металла.

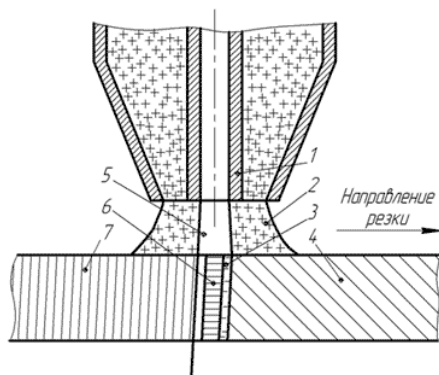


Рис. 3.3. Схема процесса газокислородной разделительной резки:

- 1 – мундштук; 2 – подогревающее пламя; 3 – жидкий металл;  
4 – разрезаемый металл; 5 – режущая струя кислорода; 6 – слой окислов;  
7 – поверхность реза

На процесс резки металла существенное влияние оказывают  
также следующие факторы:

- а) теплопроводность металла: с увеличением теплопроводности  
процесс резки затрудняется;
- б) количество тепла, выделяющееся при сгорании разрезаемого ме-  
талла: чем больше выделяется тепла, тем лучше идет процесс резки;
- в) вид шлака и состояние окислов, образующихся при резке: жид-  
котекучесть шлака и окислов способствует улучшению процесса  
резки.

Очевидно, что не все металлы, применяемые в технике, можно  
резать этим способом. Одни из них режутся хорошо, другие плохо,  
а некоторые вообще не поддаются кислородной резке.

Малоуглеродистая сталь, низколегированная и легированная  
сталь с содержанием углерода до 0,25 % хорошо поддаются кисло-

родной резке обычным способом без предварительного подогрева. Среднеуглеродистая сталь, легированная конструкционная и инструментальная сталь с содержанием углерода более 0,25 %, а также высоколегированная конструкционная сталь удовлетворительно поддаются кислородной резке с предварительным подогревом по линии реза. Высокоуглеродистая сталь с содержанием углерода более 0,8 %, чугуны, высоколегированная сталь с содержанием хрома более 10 % и вольфрама свыше 30 % поддаются кислородно-флюсовой резке с предварительным подогревом и медленным последующим охлаждением. Медь, латунь, бронза, никель поддаются кислородно-флюсовой резке. Алюминий и его сплавы, магниевые сплавы кислородной резке не поддаются.

Процесс кислородной резки влияет на разрезаемый металл: увеличивается твердость, изменяются структура и химический состав металла у кромок среза, а также создаются напряжения в зоне резки, вызывающие коробление заготовок.

## **2. Техника газокислородной и кислородно-флюсовой резки**

### *Подготовка поверхности под резку*

Поверхность металла, подлежащего резке, должна быть очищена от окалины, краски и грязи, если вырезка детали идет для последующей сборки без механической обработки кромок. Если при резке остается припуск на механическую обработку, то очистка металла необязательна.

Расстояние от режущего сопла до поверхности металла зависит от толщины металла и определяется по формуле

$$h = 5 + 0,05\delta,$$

где  $h$  – расстояние от сопла до поверхности металла, мм;  $\delta$  – толщина металла, мм.

### *Зажигание резака и регулирование пламени*

Сначала немного открывают вентиль подогревающего кислорода, затем открывают вентиль ацетилена и зажигают смесь. По внешнему виду пламени при помощи вентиля регулируют его характер, получая пламя с некоторым избытком кислорода. После этого открывается вентиль режущего кислорода. Резку всегда начинают



с края листа металла. Для начала резки пламя направляют на кромку под прямым углом. После разогрева кромки до начала плавления открывают вентиль режущего кислорода и одновременно начинают равномерное перемещение резака по линии реза. По окончании резки немедленно перекрывают вентиль режущего кислорода, а затем гасят резак. Для гашения пламени сначала перекрывают вентиль ацетилена, а затем вентиль подогревающего кислорода.

### ***Кислородно-флюсовая резка***

Процесс кислородно-флюсовой резки отличается от процесса обычной резки тем, что режущая струя подается с распыленным в кислороде порошком флюса. Основной частью флюса является порошок железа. При сгорании флюса выделяется большое количество тепла, которое повышает температуру в месте реза.

Кислородно-флюсовая резка применяется для тех металлов, которые плохо или вовсе не поддаются обычной кислородной резке.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Какие горючие газы и жидкости используют для газоокислородной сварки металлов?
2. Какие бывают виды газового пламени в зависимости от концентрации газа и кислорода в смеси газов?
3. Какие способы газовой сварки металлов применяют для производства сварных конструкций?
4. Как подобрать мощность газовой горелки для сварки металла определенной толщины?
5. Основные затруднения при газовой сварке изделий из средне- и высокоуглеродистой стали.
6. Основные затруднения при газовой сварке высоколегированной стали.
7. Необходимые условия для проведения газоокислородной разделительной резки металлов.
8. Как влияют на процесс резки теплофизические свойства металла?
9. Какие металлы не поддаются газоокислородной резке?
10. В чем сущность способа кислородно-флюсовой резки металлов?

## Модуль 4

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВАРКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

## Тема 9. Технология сварки углеродистой стали

### *Учебные вопросы*

1. Сварка углеродистой стали.
2. Технология сварки низколегированной стали.
3. Особенности сварки низколегированной среднеуглеродистой и теплоустойчивой стали.

### **1. Сварка углеродистой стали**

Низкоуглеродистая сталь с содержанием углерода до 0,25 % хорошо сваривается всеми способами сварки плавлением. В тех случаях, когда сварная конструкция имеет большую жесткость или изготовлена из толстолистового металла, назначают термическую обработку для снятия сварочных напряжений. Как правило, это нормализация при температуре 900...940 °С или высокий отпуск при температуре 650...700 °С.

Среднеуглеродистая сталь с содержанием углерода 0,26...0,45 % при сварке имеет низкую стойкость металла шва против трещин и склонна к образованию закалочных структур в шве и околошовной зоне. Для сварки такого рода стали применяют предварительный общий подогрев изделия до температуры 250...300 °С или способ сварки двумя дугами, позволяющий создавать тепловой режим в сварном соединении, близкий к режиму подогрева изделия. После сварки обычно предусматривается термическая обработка сварного соединения – закалка и высокий отпуск – для выравнивания свойств и снятия сварочных напряжений.

Высокоуглеродистую сталь с содержанием углерода 0,46...0,75 % не применяют для производства сварных конструкций, а лишь подвергают наплавке или используют в качестве наплавляемого матери-

ала. Это связано с высокой склонностью такой стали к образованию холодных трещин и закалочных структур в шве и околошовной зоне.

## 2. Технология сварки низколегированной стали

В зависимости от назначения и степени легирования применяемая в сварных конструкциях сталь делится на конструкционную сталь повышенной прочности, жаропрочную, нержавеющую и жаростойкую. По количеству легирующих элементов сталь делится на низколегированную, среднелегированную и высоколегированную. Каждая группа сталей обладает особыми свойствами и требует различного подхода при разработке технологического процесса сварки.

Низколегированной называется сталь, легированная одним или несколькими элементами, если содержание каждого не превышает 2 %, а суммарное содержание легирующих компонентов не превышает 5 %.

Низколегированные стали делятся на три группы:

- 1) низкоуглеродистые конструкционные стали;
- 2) среднеуглеродистые конструкционные стали;
- 3) теплоустойчивые стали.

Низколегированная *низкоуглеродистая* конструкционная сталь, содержит повышенное количество марганца и кремния. Например, сталь 10Г2СД имеет следующий состав: С = 0,8...0,10 %, Мп = 1,3...1,65 %, Si = 0,30 %, Cu = 0,15...0,30 %. Наиболее распространенные марки стали для сварных конструкций: 14ХГС, 10ХСНД, 12ХГН, 14Г, 19Г, 15ГС, 18ГС2. Прочность такой стали обычно составляет  $\delta = 440...540 \text{ Н/мм}^2$ .

Низколегированная *среднеуглеродистая* конструкционная сталь содержит углерод в количестве 0,25...0,45 %. Для нее характерна особая склонность к закалке в условиях термического цикла сварки. Например, 25ХГСА имеет состав: С = 0,2...0,25 %, Cr = 0,8...1,1 %, Мп = 0,9...1,2 %, Si = 0,8...1,1 %, P и S – не более 0,25 %. Прочность такой стали составляет около  $\delta = 800 \text{ Н/мм}^2$ . Марки: 30ХГСА, 40Г2, 30ХГТ.

Низколегированная *жаропрочная* сталь (теплоустойчивая) обладает повышенной механической прочностью при высоких температурах и длительной постоянной нагрузке. Такая сталь легируется молибденом и ванадием. Например, сталь 16М имеет

состав: С = 0,12...0,20 %, Мо = 0,4...0,7 %, Р и S – не более 0,3 %. Такая сталь обладает прочностью на уровне 450...500 Н/мм<sup>2</sup>. Марки: 15ХМА, 20ХМА.

Сварка малоуглеродистой низколегированной стали плавлением не вызывает затруднений. Технология сварки низколегированной низкоуглеродистой стали незначительно отличается от сварки обычной низкоуглеродистой стали и проявляется в применении электродов типа Э42А и Э50А (УОНИ 13/45, 13/55). Высокая прочность металла шва достигается путем его легирования элементами, входящими в состав основного металла. При сварке под флюсом применяются флюсы АН-348А, ОСЦ-45, АН-60 и сварочные проволоки Св-08ГА, Св-10Г2, т. е. те же, что и при сварке низкоуглеродистых сталей.

Для обеспечения пластических свойств металла шва сварку ведут двумя дугами в отдельные ванны. Сварку многослойных швов на толстом металле рекомендуется вести также двумя дугами или при сварке одной дугой производить подогрев перед наложением первого слоя до температуры 150...200 °С. В защитных газах практическое применение находит сварка в СО<sub>2</sub>. Технология также не отличается от сварки низкоуглеродистых сталей. Например, для сварки стали 15ХСНД, 14ХГС применяется проволока Св-08Г2С.

### **3. Особенности сварки низколегированной среднеуглеродистой и теплоустойчивой стали**

По чувствительности к термомодеформационному циклу к этой группе можно отнести углеродистые стали типа СТ35, СТ40, СТ45, СТ50. Повышение углерода и степени легирования стали увеличивает склонность к резкой закалке, снижает ее пластичность. Для предотвращения образования трещин необходим предварительный подогрев. Температура подогрева рассчитывается по методике, учитывающей количество эквивалентного углерода и толщину металла, и находится в пределах 150...400 °С. Для обеспечения технологической прочности сварных соединений содержание углерода в сварочных проволоках не должно превышать 0,15 %.

Для ручной дуговой сварки низколегированных сталей применяют электроды типа Э50А–Э85 по ГОСТ 9467-75. Для сварки под

флюсом используют проволоку марок Св-10ГН, Св-08ГСМТ, Св-18ХГС и др., флюс низкокремнистый марганцевый АН-15, АН-20.

При сварке в  $\text{CO}_2$  нужно применять проволоку с раскислителями, например Св-08Т2С, Св-08ГСМТ, Св-08ХГСМА и др.

Для электрошлаковой сварки применяют флюсы АН-22, АН-8, проволоки Св-08ХГ2С, Св-08ГСМТ, Св-Х5М.

При выборе сварочных материалов для молибденовых и хромомолибденовых теплоустойчивых сталей требуется гарантировать работоспособность швов при повышенных температурах, т. е. шов должен быть легирован элементами, придающими стали теплоустойчивость. Для этого применяют электродные проволоки марок Св-08ХМ, Св-08ХНФА, Св-08ГСМФА и др., электроды типа Э-М, Э-Х5МФ.

Термообработка низколегированных сталей (закалка) для повышения прочности при сохранении высокой пластичности усложняет технологию сварки. На участках рекристаллизации и старения происходит разупрочнение стали (вследствие отпуска), которое тем выше, чем выше прочность стали. Поэтому большое значение имеют скорость охлаждения сварного соединения и погонная энергия при сварке. Повышение погонной энергии сопровождается расширением разупрочненной зоны и снижением твердости в ней. Это вызвано увеличением объема металла, подвергающегося высокотемпературному нагреву, и замедлением скорости охлаждения сварного шва. Околошовная зона, где резко выражены явления перегрева и закалки, является местом образования холодных трещин. Для увеличения стойкости сварных соединений против трещин необходимо выполнять следующие мероприятия:

- 1) режим сварки выбирать в более узких пределах по значению погонной энергии;
- 2) в металле шва снижать содержание углерода и легирующих элементов;
- 3) к качеству шва предъявлять повышенные требования: обеспечить отсутствие пор, подрезов, непроваров, плавность переходов от шва к основному металлу.

Техника выполнения швов зависит от предварительной термической обработки стали. Сварка толстого металла производится мето-

дом «каскад» и «горка», что замедляет скорость охлаждения металла шва и околошовной зоны и предотвращает образование в них закалочных структур. То же достигается при предварительном подогреве изделия до температуры 150...200 °С. При сварке термоупрочненных сталей для уменьшения разупрочнения околошовной зоны рекомендуется сварка длинными швами с малой погонной энергией.

### ***Способы сварки жаропрочной низколегированной стали***

Широкое применение находит ручная дуговая сварка покрытыми электродами и сварка в защитных газах, частично электрошлаковая сварка. Состав шва стремятся приблизить к составу основного металла, для этого применяются электрод типа ЭМ, стержень которого изготовлен из проволоки Св-12М. При сварке молибденовых сталей толщиной более 10 мм производится предварительный подогрев.

При многослойной сварке следует вести процесс короткими участками («каскад», «горка»), применять легкую проковку. Применяются для сварки хромомолибденовой стали электроды типа ЭХМ, стержень Св-10ХМ. Все сварные соединения подвергаются термической обработке (нормализация с последующим высоким отпуском). При сварке в углекислом газе сталей марок 15ХМА и 20ХМА применяется проволока Св-08ХГ2СМ, и сварка ведется с подогревом до температуры 250...300 °С. Режимы сварки те же, что и при сварке низкоуглеродистой стали. После сварки назначается высокий отпуск сварных соединений. В результате сварные соединения становятся практически равноценны основному металлу.

## **Тема 10. Основные затруднения при сварке стали различного класса легирования**

### ***Учебные вопросы***

1. Технология сварки среднелегированной стали.
2. Особенности технологии сварки среднелегированной стали при различной термической обработке сварной конструкции.
3. Особенности сварки высоколегированной стали.
4. Сварка мартенситной, ферритной и жаропрочной стали.
5. Сварка двухслойной стали.

## 1. Технология сварки среднелегированной стали

Среднелегированной называется сталь, легированная одним или несколькими элементами, если содержание каждого из них лежит в пределах от 2 до 5 %, а суммарное содержание легирующих элементов изменяется от 5 до 10 %.

Среднелегированная сталь имеет прочность в пределах 600...800 Н/мм<sup>2</sup>. Среднелегированные стали в основном относятся к перлитному классу, некоторые стали с содержанием легирующих элементов 5...6 % относятся к мартенситному классу. Они, как правило, подвергаются улучшению (закалка с последующим отпуском) или закалке и низкому отпуску. После термической обработки эти стали по пластичности и вязкости превосходят некоторые низкоуглеродистые стали.

### *Особенности сварки среднелегированной стали*

Восприимчивость к закалке, высокий уровень механических свойств создают ряд специфических трудностей, возникающих при сварке сталей этой группы.

Первая трудность состоит в необходимости предупреждения возникновения холодных трещин в околошовной зоне и металле шва. Задача технологического процесса сводится к тому, чтобы наиболее простыми приемами обеспечить высокую стойкость металла околошовной зоны и металла шва против образования холодных трещин.

Вторая трудность — предупреждение образования кристаллизационных трещин в металле шва. Трудность преодолевается путем снижения содержания в металле шва углерода и серы и других элементов, снижающих стойкость металла против трещин, а также путем легирования элементами, повышающими стойкость шва против кристаллизационных трещин.

Третья трудность состоит в необходимости получения металла шва околошовной зоны и сварного соединения в целом с механическими свойствами, близкими к свойствам основного металла.

Для повышения стойкости металла шва против кристаллизационных трещин ограничивается содержание в нем углерода и некоторых других легирующих элементов. Поэтому металл шва отличается от основного металла. Особые трудности возникают,

когда изделие нельзя подвергнуть термической обработке, тогда как высокие механические свойства основного металла достигаются путем закалки и отпуска.

Наиболее серьезная трудность при сварке среднелегированной стали — это предотвращение образования холодных трещин. Такие дефекты сварного соединения, как правило, приводят к катастрофическим последствиям, поскольку холодные трещины образуются через несколько часов или даже суток после выполнения сварного шва, когда сварная конструкция уже находится в эксплуатации.

Механизм образования холодных трещин в сварных соединениях из углеродистой и легированной стали объясняется двумя гипотезами. Первая из них — «закалочная». Суть ее заключается в том, что под действием термического цикла сварки в металле сварного соединения происходит превращение «остаточного» аустенита в мартенсит. Поскольку объем зерна мартенсита больше, чем зерна аустенита, то внутри металла по линии шва возрастают внутренние напряжения, которые могут достигнуть предела текучести металла, и вследствие этого в зоне сварного соединения возникнут микротрещины. Суммарное воздействие рабочих нагрузок и внутренних напряжений приводит к образованию макротрещины, которая способна распространяться в металле шва со скоростью до двух километров в секунду.

Суть второй гипотезы — «водородной» — заключается в следующем. Растворенный в металле сварного шва атомарный водород свободно диффундирует в пределах кристаллической решетки, и при взаимодействии атомов образуется молекула водорода. Это приводит к искажению кристаллической решетки, а при большом количестве растворенного водорода в металле шва — к образованию микротрещин. Наличие микротрещин по линии сварного шва в сочетании с рабочими нагрузками приводит к образованию макротрещины, т. е. к разрушению сварного соединения.

С целью предупреждения образования холодных трещин рекомендуется принимать следующие меры:

- 1) выбирать для сварных конструкций марки стали, которые обладают требуемыми свойствами при возможно более низком содер-



жании углерода и легирующих элементов, повышающих восприимчивость стали к закалке;

2) предъявлять дополнительные требования к основному металлу в части обеспечения химической и структурной однородности. Не допускать наличия в металле шлаковых включений, расслоения и других дефектов;

3) уменьшать содержание водорода в основном металле и особенно в металле шва. Применять сварку на постоянном токе и флюс сухой грануляции;

4) регулировать сварочный термический цикл путем применения оптимальных режимов сварки. Если стойкость сварных соединений против холодных трещин настолько низка, что избежать их появления путем соответствующего выбора типа металла шва и режима сварки не удастся, то следует прибегать к регулированию термического цикла путем предварительного и сопутствующего подогрева свариваемых кромок. Для сталей данного типа достаточен подогрев до 200 °С. Подогрев осуществляется с помощью индукторов или газовым пламенем. Термический цикл сварки (режим сварки и подогрева) можно определить путем сварки специальных образцов и расчетным путем. Расчет режима сварки ведется исходя из того, что для обеспечения высокой стойкости металла против холодных трещин превращение аустенита должно быть завершено в области перлитного превращения;

5) подвергать незамедлительно термообработке (ТО) сварные соединения после сварки, когда холодные трещины еще не возникли. ТО можно провести методом наложения отжигающего валика (скоростная термическая обработка), при этом предыдущий валик и околшовная зона подвергаются термической обработке, близкой к высокому отпуску;

6) применять сварку с предварительной наплавкой кромок. На кромки наплавляется слой аустенитного или ферритного металла, не закаливающегося при сварке.

## **2. Особенности технологии сварки среднелегированной стали при различной термической обработке сварной конструкции**

В зависимости от размеров сварной конструкции, её деформируемости при нагреве, наличия оборудования для термической обработки сварные соединения из среднелегированной стали могут как подвергаться, так и не подвергаться термической обработке.

### *Сварные соединения, подвергающиеся полной термической обработке*

После термической обработки сварные соединения становятся равноценными основному металлу по всем физико-химическим свойствам при условии одинаковости химического состава металла шва и основного металла. В ряде случаев механические свойства шва выше, чем у основного металла, из-за благоприятной первичной кристаллизации и большей химической однородности металла шва.

Исходным положением для определения технологии сварки термически обрабатываемых соединений должна быть равноценность шва и основного металла по химическому составу. С этой целью следует применять электрод того же состава, что и основной металл, и принимать меры, чтобы при сварке не происходил угар легирующих элементов и шов не загрязнялся вредными примесями. Однако из-за низкой стойкости металла шва против кристаллизационных трещин при сварке большинства среднелегированных сталей, особенно при сварке металла большой толщины, приходится создавать швы с пониженным содержанием углерода. Для получения при этом высоких механических свойств шов дополнительно легируют элементами, повышающими механические характеристики (Mn, Ni, Cr). Например, Ст30ХГС варится проволокой марки Св-13ХЗГНМ. При выборе проволоки нужно учитывать, что часть легирующих элементов и углерод поступят в шов из основного металла в соответствии с долей участия его в образовании шва. Эта доля определяется методом и режимом сварки и составляет от 15 до 80 %. Кроме того, при сварке следует подбирать режимы, обеспечивающие высокое значение коэффициента формы шва, избегать узкой и глубокой разделки и применять предварительный подогрев кромок.

Грубозернистая структура участка перегрева околошовной зоны полностью ликвидируется после термической обработки. Это зна-

чит, что для сталей, подвергающихся термической обработке, можно применять высокопроизводительные режимы и методы сварки, при использовании которых образуется грубокристаллическая структура. Таковы, например, электрошлаковая сварка и сварка под флюсом с большой погонной энергией.

### ***Сварные соединения, не подвергающиеся термической обработке***

Высокие свойства сварных соединений в этом случае достигаются при условии измельчения первичной и вторичной структур металла шва и околошовной зоны.

Первичную структуру можно измельчить двумя способами: уменьшением объема сварочной ванны (и соответственно увеличением скорости ее кристаллизации) и легированием металла шва элементами-модификаторами.

Вторичную структуру металла шва можно измельчить, если будет обеспечен распад переохлажденного аустенита в нижней области температур интервала перлитного превращения (образуются перлитные структуры с высокой прочностью, пластичностью и вязкостью).

В условиях сварки обеспечить превращение аустенита можно путем регулирования скорости охлаждения сварного соединения и химического состава шва. Высокие скорости охлаждения шва достигаются за счет применения многослойной сварки при величине сечения слоя 30...50 мм<sup>2</sup>. Для повышения производительности при многослойной сварке соединений, не подвергающихся термической обработке, рекомендуется многодуговая сварка под слоем флюса разнесенными дугами. При сварке особо ответственных конструкций, если равнопрочность не является обязательным условием, прибегают к использованию электродной проволоки с высоким содержанием легирующих элементов, обеспечивающих получение металла шва с аустенитной структурой.

### ***Сварные соединения, подвергающиеся после сварки только высокому отпуску***

Иногда для повышения механических свойств и снятия сварочных напряжений применяется высокий отпуск (нагрев до 600...650 °С) или низкий отпуск (200...300 °С). Высокий отпуск более эф-

фективен, так как обеспечивает полное снятие сварочных напряжений и частично устраняет закалку металла шва и околошовной зоны. При этом прочность немного понижается, пластичность и ударная вязкость существенно возрастают. Однако высокий отпуск не обеспечивает перекристаллизацию металла и не может устранить ни столбчатой структуры, ни явления перегрева, ни полностью устранить структуру закалки. Поэтому при сварке нужно применять те же меры по измельчению первичной и вторичной структур металла шва, что и в случае сварки среднелегированной стали без последующей термической обработки сварного соединения.

### ***Способы сварки среднелегированной стали***

При сварке *покрытыми электродами* большинство конструкций свариваются вручную. Главные особенности – применение электродов с фтористо-кальциевым покрытием и использование постоянного тока обратной полярности. Швы большого сечения выполняются «каскадом» и «горкой». Режимы подбираются в зависимости от типа электродного стержня. При ферритном стержне режимы сварки те же, что и при сварке низкоуглеродистой стали. Если стержень электрода имеет аустенитную структуру, то режимы сварки такие же, что и при сварке аустенитной стали.

Способом сварки *под слоем флюса* изготавливаются конструкции толщиной от 6 до 50 мм. В тех случаях, когда сварные соединения обладают достаточной стойкостью против кристаллизационных трещин и к тому же подвергаются термической обработке, используются режимы, применяемые при сварке низкоуглеродистой стали. При сварке стали с пониженной стойкостью против трещин (повышенное содержание углерода и легирующих примесей, большая толщина свариваемых листов, большая жесткость) применяются дополнительные меры: предварительный подогрев кромок, сварка первого слоя по присадочной проволоке при увеличенном угле разделки кромок. Для сварки применяются флюсы марок АН-348, ОСЦ-45, а также низкомарганцевые и низкокремнистые флюсы марок АН-15, АН-24, АН-20.

Сварка *в защитных газах* обычно применяется при соединении тонколистовых конструкций. Её особенности – дополнительные требования к осушке газа с целью снижения предельного содержа-

ния водорода в шве, а также использование режимов, обеспечивающих пониженные скорости охлаждения сварных соединений. Эти меры необходимы для повышения стойкости сварных соединений против горячих трещин. Для сварки рекомендуется применять те же режимы, что и для низкоуглеродистой стали, но значение силы тока снижают на 15...20 %. Сварка в среде углекислого газа выполняется только плавящимся электродом, для сварки в аргоне применяется как плавящийся, так и неплавящийся электрод.

Электродшлаковая сварка – это наиболее экономичный и производительный способ сварки толстолистовых конструкций из среднелегированной стали, подвергающихся термической обработке. Сварные соединения обладают высокой стойкостью против трещин. Однако наблюдаются трещины-отколы в участке перегрева околосшовной зоны. Обычно это происходит из-за большой жесткости соединений. Трещины возникают через несколько часов после сварки. Поэтому сварные соединения сразу после сварки подвергают высокому отпуску. Кроме того, для предупреждения трещин также применяют предварительный подогрев до 150...200 °С. Для сварки применяется флюс АН-8, электродные проволоки Св-10Г2, Св-12Г2Х, Св-10ХГСМТ, Св-18ХМА, Св-10Х5М.

### **3. Особенности сварки высоколегированной стали**

К числу основных трудностей при сварке высоколегированных сталей и сплавов относятся следующие:

- 1) обеспечение стойкости металла шва и околосшовной зоны против кристаллизационных трещин;
- 2) обеспечение коррозионной стойкости сварных соединений;
- 3) сохранение свойств металла шва и сварного соединения во времени под действием рабочих температур и напряжений;
- 4) получение плотных швов, без пористости и шлаковых включений.

#### ***Обеспечение стойкости металла шва против кристаллизационных трещин***

Главный легирующий компонент, сообщающий стали коррозионную стойкость и окалиностойкость, – хром в количестве не менее 12 %. Хром относится к группе элементов-ферритизаторов, т. е. эле-

ментов, суживающих температурную область существования аустенита в диаграмме состояния системы «железо – углерод».

При высоком содержании хрома (выше 12 %) низкоуглеродистая сталь приобретает устойчивую ферритную структуру, сохраняющуюся при всех температурах. Термообработка не сопровождается их структурными изменениями, а нагрев свыше 950 °С вызывает понижение пластичности и вязкости.

При повышении содержания никеля (активный аустенизатор) высокохромистая сталь приобретает способность закаливаться на мартенсит. Такая сталь называется мартенситной сталью.

Введение в высокохромистую сталь больших количеств элементов-аустенизаторов (С, Ni), расширяющих температурную область существования аустенита, переводит сталь в устойчивое аустенитное состояние. Такая сталь называется аустенитной сталью.

Элементы-аустенизаторы: С, Co, Ni, Mn.

Элементы-ферритизаторы : Si, Mo, Ti, Cr, Nb.

Экспериментальным путем установлена относительная интенсивность действия каждого элемента в качестве аустенизатора и ферритизатора.

Если принять за единицу способность никеля аустенизировать структуру сварных швов, то эффективность действия других аустенизаторов выразится следующим образом: С – 30, Mn – 0,5.

Основной ферритизатор – хром. По отношению к нему ферритизирующая способность других элементов характеризуется такими коэффициентами: Si – 2; Mo – 1,5; Ti – 3,5; V – 1; Nb – 0,5.

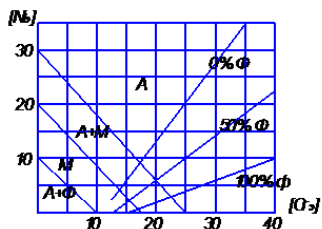


Рис. 4.1. Диаграмма Шеффлера

Для определения структурной группы, к которой относится сталь, удобно пользоваться структурной диаграммой Шеффлера

(рис. 4.1). Она позволяет до проведения сварки по химическому составу стали определить структуру сварного шва и соответственно назначить мероприятия по борьбе с горячими трещинами. На этой диаграмме по горизонтальной оси откладывается параметр «эквивалентное содержание хрома», по вертикальной оси – «эквивалентное содержание никеля». Структурные области обозначаются буквами А (аустенит), Ф (феррит), М (мартенсит).

$$[Cr]_{\text{э}} = \%Cr + \%V + 2 (\%Si) + 1,5 (\%Mo) + 3,5 (\%Ti) + 0,5 (\%Nb).$$

$$[Ni]_{\text{э}} = \%Ni + 30 (\%C) + 0,5 (\%Mn).$$

Пример. Определим структуру марки стали 20Х23Н18 (ГОСТ 5632-61) в околошовной зоне у линии сплавления.

Средний состав стали: С – 0,15 %; Si – 0,5 %; Mn – 1,5 %; Cr – 23 %; Ni – 18 %.

$$\text{Эквивалент Cr} = 23 + 1,5 \cdot 0,5 = 23,75 \%$$

$$\text{Эквивалент Ni} = 18 + 30 \cdot 0,15 + 0,5 \cdot 0,5 = 22,75 \%$$

По структурной диаграмме эта сталь лежит в области чисто аустенитной стали.

Установлено, что швы, обладающие двухфазной дезориентированной измельченной структурой (аустенит + феррит) ввиду развитой поверхности кристаллитов и значительной протяженности их границ, несравненно более стойки против образования кристаллизационных трещин, чем однофазные чисто аустенитные швы. Чтобы получить двухфазную структуру, нужно по возможности ограничивать в шве количество аустенизаторов и повышать содержание ферритизаторов. Установлено, что удовлетворительная стойкость против кристаллизационных трещин достигается при наличии в металле шва не менее 2...3 % первичного феррита. Однако многие высоколегированные стали отличаются большим запасом аустенитности, т. е. содержание аустенизаторов значительно превышает содержание ферритизаторов. Чтобы создать двухфазный аустенитно-ферритный шов, нужно ввести чрезмерно много ферритизаторов, что повлечет за собой резкое падение пластичности шва. Для такой стали (с большим запасом аустенитности) находят применение следующие средства предотвращения образования горячих трещин:

1) ограничение содержания в металле шва фосфора, серы и дополнительное легирование шва танталом, титаном, рением. Для

этой цели обычно применяют проволоку, содержащую минимальное количество вредных элементов, и режимы сварки, обеспечивающие снижение доли основного металла в шве;

2) сваривание высоколегированных сталей и сплавов с малым коэффициентом формы шва;

3) применение фтористо-кальциевых и неокислительных электродных покрытий и фторидных сварочных флюсов.

### ***Обеспечение коррозионной стойкости сварных соединений при сварке высоколегированной стали***

Высокохромистые стали (Ст10X18H9T) подвержены межкристаллитной коррозии. Если сталь нагреть до температуры 450...850 °С, то на границах зерен твердого раствора выпадают комплексные карбиды железа и хрома. Выпадение карбидов хрома влечет за собой обеднение хромом (ниже 10...12 %) пограничных слоев зерен, что приведет к потере коррозионной стойкости металла. Может возникнуть наиболее опасный вид коррозии — межкристаллитная коррозия.

Для борьбы с межкристаллитной коррозией применяются следующие средства:

1) снижение содержания углерода в основном металле до 0,02...0,03 %, т. е. до предела его растворимости в аустените. При малой концентрации углерод остается в твердом растворе при малой температуре, и в этом случае выпадение карбидов хрома исключается;

2) применение основного металла, легированного титаном или ниобием. Эти элементы обладают большим сродством к углероду, чем хром. Углерод образует устойчивые карбиды с этими элементами, а карбиды хрома не образуются;

3) закалка (от 1050 до 1100 °С) для стали типа 10X18H9T. При нагреве под закалку карбиды хрома растворяются в аустените, а быстрое остывание фиксирует однородное строение стали;

4) стабилизирующий отжиг (нагрев при 850...900 °С в течение 2—3 часов и остывание на воздухе). Нагрев при указанной температуре приводит к наиболее полному выпадению карбидов и стабилизации их состава. При последующем воздействии температуры обеднения хромом вследствие выпадения карбидов не произойдет.

Но эти меры не всегда приемлемы, так как углерод может переходить из основного металла, а термообработка не всегда осуще-



ствима из-за габаритов изделия. Местная термообработка приводит к появлению напряжений.

Наиболее эффективное средство борьбы с межкристаллитной коррозией – легирование сварных швов энергичными карбидообразователями титаном и ниобием.

### ***Обеспечение стойкости металла шва против пор***

Основной возбудитель пор – водород (азот хорошо растворим в аустените). Основные источники водорода – сварочный флюс, электродное покрытие, защитный газ, органические загрязнители на основном и присадочном металле.

Эффективными средствами предупреждения порообразования являются тщательная очистка присадки и свариваемых кромок, прокалка флюса и электродов, осушка газа, применение сварки на постоянном токе.

### ***Особые указания по технологии сварки высоколегированной стали***

1. Необходимо применять способы сварки, характеризующиеся максимальной концентрацией источника тепла, так как высоколегированная сталь обладает высоким коэффициентом линейного расширения (термической дилатацией), что при нагреве приводит к короблению изделий.

2. Повышенное электрическое сопротивление высоколегированных сталей обуславливает значительное увеличение коэффициента плавления аустенитной электродной проволоки. Это вынуждает уменьшать вылет электрода, скорость сварки и длину электрода (150...400 мм).

3. При сварке легированной стали глубина проплавления выше, чем при сварке углеродистой стали, при одном и том же значении силы тока. Для получения заданной глубины провара при сварке легированной стали значение сварочного тока снижают на 10...15 %.

4. Сварка легированной стали ведется короткой дугой (2...3 мм): чем длиннее дуга, тем сильнее окисляются легирующие элементы, что приводит к изменению химического состава шва, следовательно, и механических свойств. Кроме того, при увеличении длины дуги увеличивается разбрызгивание электродного металла. Это, во-первых, увеличивает себестоимость производства сварного шва,

во-вторых, капли расплавленного металла, попадающие на поверхность основного металла, могут вызвать появление в этих местах межкристаллитной коррозии.

При изготовлении конструкций из легированных сталей необходимо стремиться к максимальной механизации сварочных процессов, так как в этом случае (при сварке под флюсом или в аргоне) практически отсутствует разбрызгивание электродного металла.

### ***Способы сварки высоколегированной стали***

*Ручная дуговая сварка* применяется в основном для сварки металла толщиной от 3 до 10 мм. Главные особенности способа: использование постоянного тока обратной полярности, применение электродов с фтористо-кальциевым покрытием, сварка короткой дугой без поперечных колебаний электрода, сила тока на 15...20 % ниже, чем при сварке малоуглеродистой стали.

*Автоматическая сварка под слоем флюса* применяется для производства сварных конструкций толщиной 10...30 мм. Применяется постоянный ток обратной полярности. Диаметр проволоки 3...4 мм. Флюсы — АН-22, АН-26. Для сварки аустенитной стали применяют фторидные флюсы. Режимы сварки принципиально не отличаются от режимов сварки низкоуглеродистой стали.

*Сварка в среде аргона* выполняется как плавящимся, так и неплавящимся электродом. Сварка вольфрамовым электродом осуществляется на постоянном токе прямой полярности, сварка проволокой — на постоянном токе обратной полярности. Хорошее формирование сварного шва обеспечивается при струйном переносе электродного металла. Для обеспечения струйного переноса металла должна быть достаточно высокая плотность тока. Например, для диаметра проволоки 1 мм сила тока не менее 190 А; при диаметре 1,6 мм сила тока 240 А; для диаметра 2 мм сила тока 320 А.

При *сварке в углекислом газе* хром практически не окисляется. Если сварочная проволока содержит более 0,1 % углерода, то происходит науглероживание шва, что, в свою очередь, может вызвать снижение коррозионной стойкости вследствие образования карбидов хрома. Для обеспечения коррозионной стойкости в шве повышают содержание элементов-ферритизаторов. Напри-

мер, для сварки стали 1X18H9T применяют электродную проволоку марки 08X20H9СБТЮ.

Недостатками способа являются:

- интенсивное разбрызгивание металла (брызги являются очагами коррозии);
- образование трудноудаляемой пленки окислов на поверхности шва.

#### **4. Сварка мартенситной, ферритной и жаропрочной стали**

Стали ферритного и мартенситного класса (1X13, 2X13, X17, 0X17T, 1X17H2, X25T, X28) свариваются с применением присадочных материалов:

- 1) идентичных или сходных по химическому составу с основным металлом;
- 2) аустенитного или аустенитно-ферритного класса.

Низкоуглеродистые хромистые ферритные и мартенситные стали толщиной до 10 мм можно сваривать без предварительного подогрева, не опасаясь появления холодных трещин. Если сварка проводится электродами из хромистой мартенситной или ферритно-мартенситной стали, то сразу же после сварки во избежание появления холодных трещин и для повышения пластичности сварного соединения необходимо провести отпуск при температуре 700...750 градусов. При сварке аустенитными электродами отпуск может проводиться не сразу после сварки.

Низкоуглеродистые хромистые стали толщиной свыше 10 мм желательно сваривать с предварительным подогревом до 150...180 °С.

Высокоуглеродистые хромистые стали необходимо сваривать с подогревом независимо от толщины изделия.

На практике сварка мартенситной и ферритной стали осуществляется по второму технологическому варианту, так как он значительно проще и дешевле (не требуется проведения незамедлительного отпуска, а иногда и подогрева металла).

При сварке хромистых жаропрочных сталей, склонных к резкой закалке, возможно образование холодных трещин в шве и околшовной зоне. Поэтому при сварке стали такого класса обязательными условиями являются предварительный и сопутствующий подогрев металла до температуры не менее 250...300 °С и незамед-

лительный отпуск после сварки. Для ручной дуговой сварки хромистой жаропрочной стали применяются электроды марок КТИ-9, КТИ-10, ИЛ-32. Если сварное соединение из жаропрочной стали выполняется с помощью электрошлаковой сварки, то предварительный подогрев металла необязателен, но незамедлительность термообработки сварного соединения не отменяется.

## **5. Сварка двухслойной стали**

Двухслойная сталь применяется в химическом аппаратостроении для изготовления емкостей для хранения и перевозки агрессивных жидкостей и газов, для защиты от коррозии конструкций и механизмов и т. д. С целью экономии дорогостоящего материала основной слой двухслойной стали изготавливают из относительно дешевого материала (Ст3, 15К, 20К), а плакирующий слой (толщиной от 1,5 до 6 мм) — из хромоникелевой, кислотостойкой и коррозионно-стойкой стали типа 10Х18Н9Т или 10Х18Н12Т. Изготовление двухслойной стали осуществляется либо горячей прокаткой, либо электрохимическим путем, либо сваркой взрывом, либо магнитоимпульсной сваркой.

### ***Особенности сварки двухслойной стали***

1. Форма разделки кромок должна обеспечивать возможность раздельной сварки каждого слоя с проваром на всю глубину металла.
2. При сварке основного слоя необходимо предотвратить случаи проплавления участков защитного слоя.
3. При сварке плакирующего слоя необходимо предотвращать возможность провара основного слоя, так как при этом произойдет разбавление сварочной ванны металлом основы, что может вызвать коррозию сварного соединения и увеличит вероятность образования трещин в шве.
4. К сварке каждого слоя требуется особая технология сварки и особые сварочные материалы.

Для сварки двухслойной стали можно применить ручную дуговую сварку покрытыми электродами, одно- и двухэлектродную автоматическую сварку под слоем флюса, газозлектрическую и электрошлаковую сварку. Наиболее широкое распространение получила ручная дуговая сварка и автоматическая под слоем флюса.

При ручной дуговой сварке электроды выбираются применительно к каждой марке свариваемой стали. Плакирующий легированный слой сваривается аустенитными электродами марок ЦЛ-8, ЦЛ-9, ЗИО-8, основной слой сваривается электродами марок МР-3, УОНИИ 13/45, АНО-5. Техника сварки двухслойной стали предусматривает сначала сварку основного слоя, затем вырубку корня шва, а затем сварку плакирующего слоя.

При автоматической сварке основного слоя используется проволока марок Св-08, Св-08А, Св-08ГА и флюсы марок ОСЦ-45, АН-348. Для сварки легированного слоя применяется хромоникелевая аустенитная сварочная проволока Св-Х18Н8, Св-Х25Н20, Св-08Х25Н13 и флюсы АН-20, АН-26, АНФ-5. Автоматическую сварку легированного слоя ведут «расщепленным электродом», т. е. двумя электродами, расположенными параллельно на расстоянии 8...12 мм друг от друга и подключенными к одной фазе источника питания. При этом получается достаточно высокое качество шва, и доля основного металла в формировании сварного шва снижается на 35...40 %.

## **Тема 11. Ремонтная сварка и наплавка чугуна**

### *Учебные вопросы*

1. Особенности сварки чугуна.
2. Области применения сварки чугуна.
3. Классификация способов сварки чугуна.
4. Способы горячей сварки чугуна.
5. Холодная сварка чугуна.
6. Механизированная сварка чугуна порошковой проволокой.

### **1. Особенности сварки чугуна**

Перлитный чугун состоит из перлита с равномерно распределенным мелкозернистым и пластинчатым графитом. Количество перлита в структуре от 25 до 100 %. Эти чугуны обладают повышенной прочностью и пластичностью, применяются для ответственных деталей и хорошо свариваются. Получение той или другой структурной составляющей определяется химическим составом чугуна, условиями кристаллизации и остывания металла; таким образом,

одной из основных мер для получения желаемой структуры чугуна является регулирование соотношений концентраций углерода и кремния. Количество свободного углерода, выделяющегося в виде графита, зависит от скорости остывания сплава, содержания в сплаве кремния и наличия других ферритизаторов. При содержании в сплаве кремния более 4 % и медленном охлаждении отливки почти весь углерод выпадает в виде графита. Эти свойства кремния используют при сварке чугуна чугунной присадкой, в которой содержание кремния составляет от 3,5 до 4,5 %. Кремний уменьшает растворимость углерода в жидком и твердом растворе и вытесняет углерод из раствора в виде графита.

Перлитно-ферритные чугуны встречаются в массивных тяжелых отливках. Кроме перлитной составляющей и графитных включений в структуре имеется некоторое количество зерен феррита. Свариваемость этих чугунов хуже, чем перлитных.

Ферритные чугуны в структуре имеют менее 25 % перлита, углерод почти весь выделен из сплава в виде графита. Эта структура характерна для деталей крупных и массивных, а также для деталей, работающих длительное время под воздействием тепла. Сварка данного чугуна сложна и требует специальной технологии.

### *Основные затруднения при сварке*

1. Склонность к образованию твердых закаленных прослоек при быстром охлаждении сплава, нагретого до температуры 760 °С; обычно при этом образуются промежуточные структуры (мартенсит, тростит), обладающие высокой твердостью, затрудняющие обработку его обычным режущим инструментом.

2. Недостаточная пластичность чугуна, что при сварке приводит к трещинообразованию, связанному с неравномерным нагревом изделия. Чем больше распад температур между основным металлом и сварным швом, тем больше вероятность возникновения трещин. При общем равномерном нагреве детали перед сваркой до температуры 300 °С и выше опасность трещинообразования резко уменьшается.

3. Потеря пластических свойств при плавлении и затвердевании, большая жидкотекучесть в расплавленном состоянии. Переход из твердого состояния в жидкое происходит сразу, минуя пластическое состояние.

Величина и форма графита влияют на свариваемость чугуна:

а) хорошая свариваемость — мелкий пластинчатый или сферообразный графит в чугунах перлитного класса;

б) удовлетворительная свариваемость — графитные включения малого и среднего размера. Отдельные включения графита окружены достаточным полем металла, обеспечивающего свариваемость;

в) ограниченная свариваемость — крупные включения графита, образующие сплошную сетку. Сложная чугунная отливка может иметь в различных своих частях неодинаковую структуру. Толстые стенки — феррит (медленное охлаждение), тонкие с быстрым охлаждением — мелкозернистые.

## **2. Области применения сварки чугуна**

Сварка чугуна применяется для исправления дефектов литья.

После извлечения отливок из литейных форм в литейном цехе обнаруживаются значительные дефекты (раковины, недоливы, трещины, рыхлоты, пористость и др.). Большинство дефектов исправляются на специально оборудованных участках.

Кроме того, сварка чугуна позволяет исправить дефекты литья, обнаруживаемые в процессе механической обработки (раковины, пустоты, трещины). Исправление — сложная задача, требующая специальных электродов, технологии и квалификации сварщика.

Сваркой чугунных деталей можно исправить различные повреждения, полученные в процессе эксплуатации.

В частности, сварка нашла применение на ремонтных заводах с массовой однотипной продукцией (автомобили, тракторы и др.). Это позволяет применять единообразную технологию сварки, тщательно отработанную, обеспечивающую высокое качество сварного соединения.

Сварка чугуна позволяет восстановить детали больших габаритов и веса, вышедшие из строя вследствие поломок и износа. Вопрос исправления таких деталей крайне сложен и требует применения специфических способов сварки.

На современном этапе развития сварки становится возможным изготовление сварных изделий из отдельных чугунных отливок (сварно-литые чугунные изделия). Применяя высокопроизводи-

тельные способы сварки и специальную технологию, можно создавать сложные и тяжелые изделия, получая при этом значительный экономический эффект.

### **3. Классификация способов сварки чугуна**

1. Горячая сварка чугуна.
  - 1.1. Газовая сварка чугунной присадкой с применением флюса.
  - 1.2. Газовая сварка с применением присадок из цветных металлов.
  - 1.3. Дуговая сварка угольным электродом с чугунной присадкой.
  - 1.4. Дуговая сварка чугунным электродом.
  - 1.5. Дуговая сварка стальным электродом с тонкой стабилизирующей обмазкой.
    - 1.6. Литейная сварка способом промежуточного литья.
  2. Холодная сварка чугуна.
    - 2.1. Дуговая сварка стальным электродом с качественной обмазкой для сварки стали.
    - 2.2. Дуговая сварка стальным электродом со специальной обмазкой для чугуна.
    - 2.3. Дуговая сварка электродами из медно-железных сплавов.
    - 2.4. Дуговая сварка электродами из медно-никелевых сплавов.
    - 2.5. Дуговая сварка электродами из железоникелевых сплавов.
    - 2.6. Газовая низкотемпературная сварка специальной чугунной присадкой.

Качество сварного соединения в чугунных изделиях определяется следующими показателями:

- а) обрабатываемость обычным режущим инструментом;
- б) одинаковая твердость металла шва, переходных зон и основного металла;
- в) равнопрочность сварного соединения основному металлу;
- г) одинаковый химический состав и структура наплавленного и основного металла.

### **4. Способы горячей сварки чугуна**

Предварительный подогрев изделия перед сваркой уменьшает скорость охлаждения наплавленного металла и препятствует образованию твердых закалочных структур, одновременно ослабляет об-



щее напряженное состояние свариваемого изделия и предотвращает образование трещин. Достаточный для большинства изделий нагрев до 400...450 °С при сварке жестких и сложных деталей должен быть повышен до 550...600 °С. Способы нагрева определяются условиями производства. Массовые однотипные работы выполняются в специальных нагревательных печах (например, печи конвейерного типа), в горнах, газовых или электрических печах. Индивидуальные изделия подогреваются во временных горнах с применением древесного угля, кокса или газа. Горячая сварка выполняется только в нижнем положении. Обработка завариваемого участка под сварку заключается в тщательной вырубке всех трещин, раковин и надорванных мест, при этом должен быть вырублен весь рыхлый металл.

Вследствие высокой температуры основного металла, подогретого для сварки, затвердевание наплавленного металла замедляется, поэтому при горячей сварке нужно хорошо заформовать место сварки, чтобы не дать растечься жидкому металлу. При формовке часто пользуются графитовыми, угольными или коксовыми пластинками, для больших деталей формовкой служит формовочная смесь высокой прочности (кварцевый песок, замешанный на жидком стекле). Заформованная деталь подвергается предварительной сушке до полного удаления влаги.

### ***Последовательность технологических операций при проведении горячей сварки***

***Первое***, что надо делать, — это подготовить детали к сварке. Для этого надо очистить поверхность пламенем горелки или металлическим скребком (щеткой), а если потребуется, то и зубилом. Кромки надо разделить под углом 70°.

***Второе*** — подогреть детали. Мало- и среднегабаритные детали надо подогревать до температуры 300... 400 °С, а крупногабаритные — до 500...600 °С (до появления коричнево-красного цвета).

***Третье*** — процесс установки детали. Следует установить деталь в зоне действия вытяжной вентиляции с расположением дефекта в нижнем положении и горизонтальной плоскости (продолжительность перерыва между окончанием подгрева и началом сварки для небольших отливок несложной конфигурации не должна превышать 3...5 мин во избежание охлаждения детали ниже 400 °С).

**Четвертое** – нагрев и обработка поверхности. Для этого нужно отрегулировать нормальное пламя удельной мощности 100...120 л/ч на 1 мм толщины металла и восстановительной его частью (на расстоянии 2...3 мм от ядра) равномерно прогреть кромки дефекта до расплавления с одновременным нанесением флюса и равномерным распределением его по поверхности дефекта с помощью присадочного прутка.

**Пятое** – заполнение места сварки присадочным металлом. Расплавить прутки наиболее горячей частью пламени (ближе к ядру) и заполнить дефект (трещину, ржавчину) расплавленным присадочным металлом, добавляя периодически флюс на кончике прутка.

Вести сварку ванным способом (отдельными сварочными ваннами длиной 20...50 мм каждая) с поддержанием металла в жидком состоянии до полного заполнения дефекта присадочным металлом; при заварке краевых дефектов поддерживать ванну в полужидком состоянии (для исключения стекания металла) путём периодического отведения пламени от места дефекта и изменения угла наклона горелки к поверхности изделия с 80 до 10°.

Удалять неметаллические включения из ванны в процессе сварки с помощью флюсования жидкого металла и интенсивного его перемешивания присадочным прутком.

**Шестое** – это окончание процесса сварки. Сначала надо медленно отвести горелку от поверхности ванны на 50...60 мм и наплавленный металл подогреть пламенем в течение 0,5...1,5 мин, накрыть деталь листовым асбестом для замедленного охлаждения металла шва и обеспечения свойств сварного соединения, равноценных со свойствами основного металла.

Последним следует этап термообработки. Детали нагреваются: мелкие – до 300...400 °С, крупные – до 500...600 °С с последующим медленным охлаждением.

#### ***Ацетиленокислородная сварка***

Сварка выполняется нормальным пламенем. В качестве присадочного металла применяются чугунные прутки марки А и Б по ГОСТ 2671-44 диаметром 8...16 мм. В качестве флюса используют: 1) бура техническая безводная (кристаллическую буру нагревают до 400 °С, после остывания растирают в мелкий порошок); 2) бура плавленная.

Газовая сварка чугуна по сравнению с другими способами обладает технологическими преимуществами. Основным из них является возможность регулирования в широких пределах скорости нагрева и величины нагреваемых зон, прилегающих к сварному шву, скорости заполнения сварочной ванны присадочным металлом и скорости охлаждения заваренного участка.

Эти приемы широко используются в практике и дают возможность получать металл в сварном соединении, соответствующий по качеству основному металлу. Процесс сварки выполняют по следующей технологии:

- предварительный подогрев сварных кромок горелкой до температуры 750...800 °С;
- обработка нагретой поверхности флюсом и дальнейшее повышение температуры до 960...1100 °С;
- внесение в зону сварки присадочного стержня и расплавление его с образованием сварочной ванны.

Глубину расплавления можно регулировать в пределах 3...6 мм. Способ применяется при ремонте мелких деталей.

### ***Сварка угольным или графитовым электродом***

В отличие от газовой этот вид сварки характеризуется более высокой температурой и большой концентрацией тепла. Сварка ведется на постоянном токе прямой полярности. Диаметр электрода 8...20 мм. Сила тока 350...800 А определяется диаметром электрода и толщиной свариваемого металла. Диаметр чугунного присадочного прутка 6...14 мм. Флюсы те же, что и при газовой сварке. При правильно выполненном процессе шов обладает механическими свойствами, структурой и химическим составом литейного чугуна.

Флюс выполняет следующие функции:

- 1) очищает свариваемую поверхность основного металла от окислов и загрязнений за счет их растворения в слое расплавленного флюса;
- 2) растворяет легкоплавкие соединения;
- 3) защищает расплавленную ванну от окисления;
- 4) увеличивает жидкотекучесть сварочных шлаков и ванны расплавленного металла и смачиваемость основного.

Бура техническая безводная – обычный флюс. Флюс вносится в виде порошка на нагретую поверхность и присадочный пруток.

### *Дуговая сварка чугуном электродом*

Горячая дуговая сварка применяется при исправлении крупных литейных дефектов в тяжелых чугунных отливках.

В промышленности применяют много разнообразных обмазок для чугунных электродов. Обмазки должны хорошо стабилизировать дуговой промежуток, защищать от выгорания электродный металл в процессе его плавления и переноса через дуговой промежуток, легировать металл шва.

Наиболее распространен электрод марки ОИЧ-1, имеющий толщину слоя покрытия 0,1...0,2 мм и стержень, изготовленный из чугунного прутка марки А или Б диаметром 10...18 мм. Длина стержней 350...500 мм. Разделка должна быть обязательно заформована. Подготовленная деталь подвергается нагреву до 350...400 °С. Сварка может выполняться от источников как переменного, так и постоянного тока. Сила тока 50...90 А на 1 м диаметра электрода. После зажигания дуги сварщик оплавляем кромки изделия и образует ванну расплавленного металла. При нормальном нагреве ванна оплавляем стенки детали, и жидкий металл хорошо смачивает основной. Дуга находится в центре сварочной ванны.

Для ускорения процесса заварки дефектов большого объема в ванну добавляют огарки чугунных электродов или заранее приготовленные куски чугунного лома. Процесс сварки заканчивается наплавкой поверхности выше уровня основного металла на 2...6 мм. Данное усилие выполняет роль прибыли, в ней концентрируются шлаки, образуется литейная корка.

### **5. Холодная сварка чугуна**

Разработка всех способов холодной сварки чугуна направлена на решение следующих задач:

1) получение сварного соединения, обрабатываемого обычным режущим инструментом. Ряд электродов (в основном из меди, никеля и их сплавов) дают обрабатываемый металл шва. Отдел сварки ЦНИИТМАШ еще в 50-х годах XX века разработал электроды ЦЧ-4, дающие обрабатываемый металл шва. Вопрос получения обрабатываемых околошовных зон полностью не решен (околошовная зона получается закаленной из-за высокой скорости охлаждения);

2) создание условий, снижающих внутренние напряжения и предупреждающих трещинообразование. Эта задача очень сложная, решена не полностью;

3) получение наплавленного металла, близкого по химическому составу основному металлу. Эта задача применительно к холодной сварке практически не решена.

Холодную сварку чугуна осуществляют стальными электродами и электродами из цветных металлов.

### *Сварка стальными электродами*

Наплавка валика на чугунную деталь стальным электродом дает в первом слое половинчатые сплавы чугуна и высокоуглеродистые стали с содержанием углерода 1,6...1,8 %. Такие сплавы легко образуют твердые закаленные зоны и обладают большой хрупкостью. Технологические приемы сварки чугуна направлены на снижение твердости, хрупкости и трещинообразования в переходных зонах и в первых слоях наплавки. Такими приемами являются:

- 1) выполнение сварки первых слоев на режимах с малой погонной энергией;
- 2) применение электродов малого диаметра (3...4 мм);
- 3) уменьшение силы тока до 90...150 А;
- 4) обеспечение минимальной глубины проплавления (1,5...2 мм);
- 5) применение обратного слоя (после наплавки первого валика длиной 50...60 мм сварщик сейчас же накладывает на этот валик второй слой). Такая термообработка является местной и улучшает структуру сварного соединения.

Эти меры улучшают структуру переходных зон и увеличивают пластичность первого слоя наплавки, но полностью закалку и возникновение трещин не устраняют.

Широкая производственная проверка стальных электродов показала, что малоуглеродистые тонкообмазанные и качественные электроды в ряде случаев вполне обеспечивают надежное сварное соединение чугуна. Из числа качественных электродов хорошо зарекомендовали себя электроды марки УОНИ 13/55, дающие надежное сплавление с чугуном. Наплавленный металл обладает некоторой вязкостью, а во 2-м и 3-м слоях — обрабатываемостью. Электроды

ЦЧ-4 дают удовлетворительную обрабатываемость наплавленного металла. В ЦЧ-4 введен сильный карбидообразователь — ванадий.

### *Сварка стальным электродом с свертышами*

При ремонте тяжелых и громоздких чугунных деталей в тело детали свертывают по резьбе стальные шурупы для получения равнопрочного соединения (рис. 4.2).

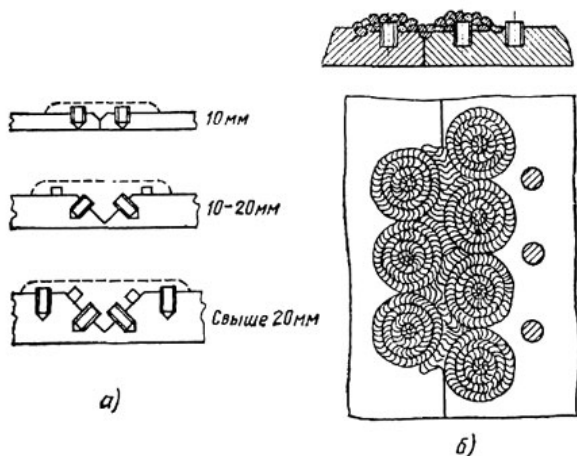


Рис. 4.2. Схема заварки дефекта чугунной детали стальным электродом:  
а — схема расположения свертышей; б — схема обварки свертышей кольцевыми швами

Диаметр шурупа 6...12 мм в зависимости от толщины стенок детали, глубина свертывания должна составлять 1,5...2 диаметра шурупа. Суммарная площадь шурупов не должна превышать 25 % площади излома. Завариваемое место следует тщательно очистить от грязи и масла. При толщине детали до 12 мм вырубка фасок необязательна, при большой толщине в месте излома вырубается V-образная или X-образная разделка кромок под углом 80...90°. При рассверливании гнезд и нарезании резьбы в них нельзя применять масло. Шурупы должны быть плотно ввернуты в приготовленное гнездо.

Сварка начинается с обварки кольцевыми валиками всех установленных шурупов. При сварке нужно давать перерывы для охлаждения детали. На расстоянии 50...100 мм от шва температура основного металла не должна превышать 50...60 °С (терпит рука).

Крайние ряды шурупов должны обвариваться после того, как заварен весь исправляемый участок. При многослойной сварке валики должны пересекаться под углом. Для уменьшения количества наплавленного металла и увеличения прочности и жесткости сварного соединения полезно усиливать завариваемый участок вваркой различных косынок и накладок.

### ***Сварка электродами из цветных металлов***

Применение электродов из цветных металлов для дуговой сварки чугуна имеет целью получение металла сварного соединения, обрабатываемого обычным режущим инструментом. Медь и никель, не образующие с углеродом никаких соединений и не растворяющие его, позволяют получать мягкие наплавки с обеспечением 80...90 % от прочности основного металла.

### ***Сварка медно-железными электродами***

Многочисленные исследования медно-железных электродов показали наилучшие результаты при содержании в сплаве 80...95 % меди и 5...20 % железа. Эти сплавы дают достаточно прочное соединение и удовлетворительную обрабатываемость. Эти электроды для сварки чугуна применяются очень давно. Существует несколько способов их приготовления:

- 1) медный стержень с оплеткой из жести, покрытый тонкой стабилизирующей обмазкой;
- 2) медный стержень в железной трубке со стабилизирующей обмазкой;
- 3) электрод из биметаллической проволоки (медь на проволоке, электролитическое омеднение);
- 4) пучок из медных и стальных электродов;
- 5) медный стержень с обмазкой основного типа (мрамор, плавиковый шпат), в которую введен железный порошок (электроды ОЗЧ-1).

Электроды ОЗЧ-1 дают лучшие результаты в сочетании с проковкой, но они достаточно дорогие. Сварка производится короткими участками вразброс, чтобы не допустить перегрева. Основное преимущество железомедных электродов – возможность эффективной проковки наплавленного ими металла в горячем состоянии, что снижает усадочное напряжение и уменьшает опасность образования трещин в околосшовной зоне. Недостаток – неоднородная структу-

ра: в мягкой медной основе расположены включения твердой железной составляющей, затрудняющей механическую обработку.

### *Сварка электродами, содержащими никель*

Электроды используют главным образом для заваривания различных дефектов, обнаруженных в процессе механической обработки, где местное повышение твердости недопустимо. Для этих целей применяют медно-никелевые и железоникелевые сплавы:

- типа «монель» (Ni – 65...75 %; Cu – 27...30 %; Fe – 2...3 %; Mn – 1,2...1,8 %);
- типа «мельхиор» (Ni – 80 %, Cu – 20 %).

При сварке этими сплавами отбел переходной зоны значительно меньше, чем при сварке стальными и медно-железными электродами. Недостаток этих сплавов – большая литейная усадка, которая ведёт к появлению горячих трещин в металле, снижающих прочность сварных соединений. Поэтому эти электроды не применяются для заварки трещин в изделиях, несущих силовую нагрузку. Электроды из монель-металла могут применяться для выполнения облицовочного промежуточного слоя, после чего сварка ведется электродами другого состава. Это дает возможность уменьшить отбел в околосшовной зоне. Например, при сварке с ввертышами облицовочный слой наплавляют из монель-металла, затем наплавку ведут электродами УОНИ 13/55. Соединение получается удовлетворительным по механической прочности и обрабатываемости. При этом должна соблюдаться минимально возможная глубина проплавления (1,5...2 мм), короткие швы (40...60 мм) и проковка швов.

Железо-никелевые электроды ЦЧ-3 и ЦЧ-3А разработал ЦНИИТМАШ в 1960-х годах для сварки высокопрочного чугуна. В них применяется стержень из сплава железа с 55 % никеля для сварки серого чугуна. Электроды изготавливаются с обмазками основного типа. Сварка ведется постоянным током на обратной полярности. Наплавка легко обрабатывается, так как величина отбела зоны термического влияния (ЗТВ) незначительна. Это определяется графитизирующим влиянием никеля.



### ***Сварка аустенито-медным электродом***

Электрод марки АНЧ-1 состоит из стержня, изготовленного из стали марки 04Х18Н9, и медной оболочки. На электрод наносится покрытие фтористо-кальциевого типа. Аустенито-медные электроды по сравнению с железомедными обладают следующими преимуществами:

- большой стойкостью против трещин и пор;
- лучшей обрабатываемостью, так как отбел чугуна незначителен, благодаря графитизирующей способности никеля и меди.

Кроме того, аустенито-медные электроды, как и железоникелевые и железомедные, в сочетании с проковкой шва обеспечивают необходимую плотность сварного соединения.

### ***Низкотемпературная заварка литейных дефектов в чугунных деталях***

Данный способ состоит в заварке литейных дефектов без расплавления основного металла. Применяются присадочные прутки марок НЧ-1 и НЧ-2.

Флюс-пасты, применяемые для сварки, содержат 5 % двуокиси титана, 10 % азотнокислого калия, 12 % фтористого натрия, 40 % буры плавленной, 11 % ферротитана, 15 % углекислого лития, 7 % железного порошка, 7 весовых частей керосина на 50 частей сухой смеси. При заварке тонкостенных изделий прутками НЧ-1 можно применять флюс ФСЧ-1.

При сварке прутками НЧ-2 используется флюс ФСЧ-2, состоящий из 18 % буры, 25 % углекислого натрия, 56,5 % азотнокислого натрия, 0,5 % углекислого лития.

Место сварки зачищают до металлического блеска. При толщине стенки до 10 мм кромкам придают V-образную форму с углом раскрытия 70...90°, при толщине стенки более 10 мм – X-образную. Литейные дефекты (поры, шлаковые включения) вырубают и кромки разделяют с общим углом раскрытия шва 45...60°.

Перед сваркой деталь подвергают местному нагреву горелкой до 300...400 °С, детали более сложной формы – общему нагреву в печи до той же температуры. На нагретую поверхность наносят слой флюс-пасты и место сварки нагревают горелкой до 820...860 °С. Пламя должно быть нормальным. При такой температуре флюс-паста

начинает плавиться, покрывая место сварки тонкой пленкой. Присадочный стержень покрывается флюс-пастой и расплавляется, постепенно растекаясь по завариваемой поверхности. Сварку ведут справа налево, пламя горелки перемещают впереди шва. После заварки изделие медленно охлаждают в песке или под слоем асбеста.

Такой способ сварки обеспечивает отсутствие зоны отбеленного чугуна, так как основной металл не доводится до состояния плавления, наплавка получается плотной, мягкой и хорошо обрабатывается резцом. Ремонтируемое изделие испытывает незначительные внутренние напряжения, и трещины при заварке не образуются. Для низкотемпературной сварки чугуна используют пропан-бутан-кислородное пламя с подогревом мундштука (2700 °С) и горелки ГЗУ-1-62 и ГЗМ-1-62. Для сварки применяются прутки НЧ-1 и НЧ-2 указанного выше состава. При сварке металла толщиной 6...12 мм применяют V-образную подготовку кромок без притупления с увеличенным зазором (до 3 мм) и углом разделки кромок 55°. Пруток держат под углом 30...35°, а мундштук горелки — под углом 45° к поверхности металла. Предварительно очищенные кромки нагревают до 300...400 °С, покрывают их флюсом и снова нагревают до 820...860 °С. В этот момент в пламя вводят покрытый флюсом пруток и перемешивают его концом ванну, заполняя ее металлом доверху с небольшой выпуклостью. Сварку ведут без перерыва. При толщине металла 6 мм делают один проход, при 9...12 мм — два прохода.

Металл наплавки имеет структуру с равномерно распределенным мелкопластинчатым графитом, твердость металла шва и переходной зоны 220...245 НВ при твердости основного металла 140...160 НВ.

## **6. Механизированная сварка чугуна порошковой проволокой**

Получение наплавленного металла со структурой серого чугуна возможно при условии использования порошковой проволоки специального состава. При наплавке порошковой проволокой с высоким содержанием углерода величина отбеленной зоны уменьшается, и сама зона может при предельных условиях отсутствовать.

Способ сварки порошковой проволокой, разработанный ИЭС им. Е.О. Патона, позволяет не только механизировать трудоемкий

процесс ручной сварки чугуна, но и получить высокое качество металла шва и околошовной зоны. В настоящее время отработаны три типа порошковой проволоки: ППЧ-1 — для холодной сварки серого чугуна; ППЧ-2 — для сварки серого чугуна с подогревом; ППЧ-3 — для горячей сварки серого чугуна. Сварку порошковыми проволоками можно выполнить на полуавтоматах А-765, А-537, ПШ-54, ПШ-5 и др.

Наплавленный металл и околошовная зона имеют сравнительно невысокую твердость и хорошо обрабатываются. Металл сварки на указанном режиме имеет ферритно-перлитную структуру с пластинчатым графитом, отбел обычно отсутствует, но могут встречаться отдельные участки цементита.

Иногда при ремонте мелких дефектов в крупных толстостенных отливках следует применить их подогрев до 250...300 °С, что предупреждает образование цементита и мартенсита.

Механизированная сварка серого чугуна порошковой проволокой в среде углекислого газа предложена Институтом электросварки им. Е.О. Патона. Достоинства нового способа заключаются в том, что он позволяет получить металл шва и околошовной зоны со структурой серого чугуна. Механические свойства вполне удовлетворительные. Швы, сваренные порошковыми проволоками, мало склонны к образованию отбела по линии сплавления. Это обусловлено большим содержанием углерода в наплавленном металле, что вызывает обратную диффузию углерода из шва в околошовную зону, и режимами сварки, обеспечивающими небольшие скорости охлаждения. В основном сварка ведется без подогрева. Для больших изделий при малом размере дефекта требуется предварительный подогрев до 250...300 °С. В этом случае шов обрабатывается легкорезущим инструментом.

### *Электрошлаковая сварка чугуна*

Институтом электросварки им. Е.О. Патона разработан способ электрошлаковой сварки чугуна с применением пластинчатых чугунных электродов толщиной 16...18 мм и фторидных флюсов АНФ-6 и АНФ-7, а в качестве формирующих устройств используются неподвижные медные ползуны, охлаждаемые водой.

*Технология и сварочные материалы производства  
компании Castolin Eutectic*

Разделку трещин при подготовке детали к сварке рекомендуется проводить с помощью специальных разделочных электродов типа ЕС 4000. Данные электроды позволяют удалять изношенный металл, выжигать масло и примеси из околошовной зоны при очень малом подогреве детали. Производительность при разделке выше, чем при работе абразивным инструментом, в 4...5 раз (рис. 4.3).



Рис. 4.3. Форма разделки кромок трещины электродом

U-образная разделка, получаемая при работе разделочным электродом, по сравнению с традиционной V-образной для абразивного инструмента позволяет экономить до 30 % дорогостоящих материалов для сварки чугуна.

Для ремонта чугунных деталей рекомендуется использовать ручные электроды типа ЕС 4040, которые позволяют уверенно проводить сварку в любом пространственном положении. Специальные добавки в обмазке электрода обеспечивают организацию углерода в околошовной зоне в форме шаровидного графита. Это исключает риск образования трещин. Замедленное плавление стержня электрода даёт возможность сварки старых и замасленных чугунных деталей. Ручной электрод типа ЕС 4040 позволяет сваривать чугун со сталью, никелевыми сплавами и сплавами на основе меди.

Для герметизации микропор в околошовной зоне предлагается пруток для капиллярной пайки типа Castolin 157. Низкая температура плавления, высокая текучесть позволяют обеспечить герметичность водяных рубашек двигателей внутреннего сгорания, масляных ванн редукторов и т. п.

Технология и сварочные материалы производства компании Castolin Eutectic позволяют выполнять надёжный ремонт методом ручной электродуговой сварки деталей практически из любых марок чугуна (кроме высокохромистого и отбелённого).

## **Тема 12. Сварка и наплавка сплавов на основе алюминия и магния**

### *Учебные вопросы*

1. Общие характеристики алюминиевых сплавов.
2. Особенности сварки сплавов на основе алюминия.
3. Способы сварки алюминия и его сплавов.
4. Оценка технологичности способов сварки алюминиевых сплавов.
5. Сварка плавлением магниевых сплавов.

### **1. Общие характеристики алюминиевых сплавов**

Алюминий и его сплавы играют важную роль в современной промышленности. Это обусловлено тем, что большинство промышленных сплавов алюминия обладает рядом уникальных свойств: сочетание высоких механических свойств (высокая удельная прочность) и уникальных физических свойств (малая плотность, высокая теплопроводность, которая в 3...3,5 раза выше, чем у стали).

Основными областями применения являются транспорт (авиационная промышленность, кораблестроение, вагоностроение), строительство (металлоконструкции общего назначения) и упаковочная промышленность (рис. 4.4).



Рис. 4.4. Применение алюминия и его сплавов в промышленности

Большинство промышленных сплавов представляют собой сложные металлургические системы. В качестве основных легирующих элементов для алюминия используют магний, марганец, медь, кремний, цинк, реже — никель, титан, бериллий, цирконий.

Большинство легирующих элементов образуют с алюминием твердые растворы ограниченной растворимости, а также промежуточные фазы с алюминием и между собой (например,  $Mg_2Si$ ,  $CuAl_2$ ). Суммарное содержание легирующих элементов, как правило, не превышает 15 %. В зависимости от состава и количества легирующих элементов различают деформируемые и литейные сплавы алюминия.

В связи с тенденцией замены черных металлов алюминием и его сплавами во многих отраслях техники, строительства и транспорта эту замену следует осуществлять с учетом технико-экономических преимуществ того или иного сплава перед сталью. При использовании алюминиевых сплавов необходимо также учитывать их коррозионную стойкость и свариваемость.

Коррозионная стойкость алюминия и его сплавов определяется наличием на поверхности изделий плотной окисной пленки. Алюминий совершенно нетоксичен, чем определяется широкое применение его в пищевой промышленности. Он весьма стоек в окислительных средах. В связи с этим его используют в сосудах для транспортировки и получения азотной кислоты и т. п. Как правило, чем меньше примесей в техническом металле, тем выше его коррозионная стойкость. Алюминий и его сплавы совершенно непригодны для работы в щелочной среде.

Под свариваемостью понимают совокупность свойств, определяющих возможность получения сварных соединений и слоя наплавленного металла определенного качества при данном способе сварки (наплавки). Чем легче получаются качественные соединения, тем выше свариваемость сплава. Многогранное понятие «свариваемость» включает склонность сплавов к образованию трещин, пористости, механические свойства сварных соединений, коррозионную стойкость и пр. При сварке плавлением свариваемость зависит от химического состава сплава и его структуры, которая создается в результате металлургического передела слитка. Среди физико-химических характеристик металла наибольшее влияние на свариваемость

оказывают наличие окисной пленки, химический состав, теплопроводность, температура плавления, плотность, коэффициенты теплопроводности и линейного расширения. Последнее приводит к тому, что уровень деформации алюминиевых сварных конструкций в 1,5...2 раза выше, чем у аналогичных стальных конструкций.

Чтобы обеспечить алюминиевым сварным конструкциям требуемую форму и размеры, используют конструктивные и технологические методы уменьшения сварочных деформаций. К числу этих методов относят правильный выбор толщины свариваемых деталей, соответствующее конструирование сварного соединения при сварке разнотолщинных деталей, предварительный подогрев свариваемых поверхностей.

При сварке (наплавке) алюминия и его сплавов следует учитывать величину критического сварочного тока. Этот ток определяется рядом факторов, которые недостаточно изучены. Увеличение сварочного тока выше критического значения нарушает процесс формирования сварочного шва, его поверхность покрывается морщинистыми складками, а глубина проплавления резко уменьшается. Величина критического тока зависит от вида сварки, качества защиты поверхности сварочной ванны инертным газом, состава этого газа, толщины свариваемых элементов.

В настоящее время в России наиболее распространена аргонодуговая сварка неплавящимся электродом алюминия и его сплавов на переменном токе. Этот метод не является оптимальным для всех видов сварных соединений, так как имеет недостаточно высокую производительность. Механизированная сварка плавящимся электродом в среде аргона, например, обеспечивает в 4...5 раз большую производительность, но худшее удаление окисных пленок. Это отрицательно скажется на механических свойствах сварных соединений. Механизированная импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом, которая мало применяется в России, устраняет этот недостаток, однако свойства сварных соединений изучены недостаточно полно. Появившиеся в последнее время современные источники питания, например ВД-306ДК, используют комбинированную вольт-амперную характеристику (ВАХ) и позволяют получать качественные сварные соединения при сварке алюминия и его сплавов.

ВАХ имеет ряд участков, каждый из которых отвечает за определенную стадию массопереноса, включая формирование капли, ее отрыв от электрода и перенос в сварочную ванну. Современные инверторные источники питания, получившие распространение и в России, также позволяют получать качественные сварные соединения алюминия и его сплавов.

## **2. Особенности сварки сплавов на основе алюминия**

Технология сварки алюминия и его сплавов достаточно многообразна, виды сварки перечислены выше и имеют ряд особенностей. К числу основных особенностей сварки алюминия и его сплавов любым из перечисленных методов относятся: необходимость удаления окисной пленки с поверхности свариваемых изделий, тщательная подготовка под сварку, предварительный подогрев и др. К основным трудностям сварки алюминия и его сплавов относятся:

1) наличие и возможность образования тугоплавкого окисла  $Al_2O_3$  ( $T_{пл} = 2050\text{ }^\circ\text{C}$ ) с плотностью больше, чем у алюминия; это затрудняет наплавку и способствует загрязнению наплавленного металла;

2) резкое падение прочности при высоких температурах, которое может привести к разрушению (проваливанию) твердого металла нерасплавившейся части кромок под действием веса сварочной ванны. В связи с высокой жидкотекучестью алюминий может вытекать через корень шва;

3) повышенная склонность к короблению в связи с большой величиной коэффициента линейного расширения ( $\alpha = (21...24,7)10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) и низким модулем упругости сплава. Уровень сварочных деформаций в 1,5...2 раза выше, чем у аналогичных стальных конструкций;

4) необходимость самой тщательной химической очистки сварочной проволоки и механической очистки и обезжиривания наплавляемой поверхности. Из-за резкого повышения растворимости газов и их задержки в нагретом металле при его остывании возникает интенсивная пористость, обусловленная водородом и приводящая к снижению прочности и пластичности металла. Предварительный и сопутствующий подогрев замедляет кристаллизацию металла сварочной ванны, что способствует более полному удалению газов и снижению пористости;



5) необходимость применения мощных источников теплоты вследствие высокой теплопроводности алюминия. С этой точки зрения в ряде случаев желателен подогрев начальных участков шва до температуры 120...150 °С или применение предварительного и сопутствующего подогрева;

б) склонность наплавленного металла к возникновению трещин в связи с его грубой столбчатой структурой и выделением по границам зерен легкосплавных эвтектик, а также развитием значительных усадочных напряжений в результате высокой литейной усадки алюминия (7 %).

### **3. Способы сварки алюминия и его сплавов**

Для алюминия и его сплавов применяют практически все промышленные способы сварки плавлением. К основным методам сварки относятся ручная дуговая сварка покрытыми электродами (ММА), аргонодуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом с подачей присадочной проволоки (TIG), плазменная сварка, механизированная сварка в защитном газе, имеющая как минимум четыре разновидности: импульсная полуавтоматическая сварка, традиционная полуавтоматическая сварка, полуавтоматическая сварка с управляемым массопереносом на инверторном источнике питания, механизированная сварка на источниках питания типа ВД-306ДК с комбинированной вольт-амперной характеристикой. Другие виды сварки алюминия и его сплавов, такие как автоматическая сварка под слоем флюса и газовая сварка, применяются значительно реже и рассматриваться не будут. Каждый способ сварки имеет свои особенности, которые необходимо учитывать для наиболее эффективного их использования при изготовлении изделий различного назначения.

#### ***Ручная дуговая сварка покрытыми электродами***

Ручную дуговую сварку покрытыми электродами применяют при изготовлении конструкций из технического алюминия, сплавов АМц и АМг, содержащих до 5 % магния, а также силумина. Толщина свариваемого металла лимитируется диаметром электрода. Минимальный диаметр электрода обычно составляет 3...4 мм, что вызвано

трудностями сварки электродами малого сечения вследствие высокой скорости их плавления. Алюминиевый электрод расплавляется в 2...3 раза быстрее стального. В связи с этим толщина свариваемого металла должна быть свыше 5 мм.

Наиболее распространенным типом сварного соединения для алюминия является стыковое. Соединений внахлестку и тавровых избегают, так как возможно затекание шлака в зазоры, из которых его трудно удалить при промывке после сварки. Наличие шлака в зазоре может вызвать коррозию металла.

Отличие от ручной дуговой сварки стальных металлоконструкций заключается в том, что алюминий имеет значительно более высокую теплопроводность, чем сталь. Это приводит к тому, что шлак при ручной дуговой сварке не успевает удаляться из расплавленного металла сварного соединения ввиду малого времени нахождения сварочной ванны в расплавленном состоянии и остается в соединении в виде дефектов.

Сварку алюминия рекомендуется выполнять непрерывно в пределах расплавления одного электрода, так как при случайных обрывах дуги кратер покрывается пленкой шлака, препятствующей повторному зажиганию дуги. Такой же коркой покрывается торец электрода.

Для ручной дуговой сварки алюминия необходим подогрев (для металла средних толщин — до 250...300 °С, для больших толщин — до 400 °С), который позволяет получать требуемое проплавление при умеренных сварочных токах.

Обязательно прокаливание электродов перед сваркой, так как покрытие электродов гигроскопично. Например, для наиболее распространенных электродов марок ОЗА-1 и ОЗА-2 рекомендуется прокатка при температуре 150...200 °С в течение не менее получаса.

Сварку алюминия покрытыми электродами выполняют постоянным током обратной полярности. В качестве источников питания применяют специальные сварочные выпрямители с полого падающей внешней характеристикой и повышенным (более 80 В) напряжением холостого хода. Хорошо себя зарекомендовали выпрямители типа ВД-306ДК, ВД-506ДК.

Сварочный ток выбирают по диаметру электродного стержня в зависимости от толщины основного металла (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Ориентировочные режимы и затраты материалов при ручной дуговой сварке алюминия и его сплавов покрытыми электродами

| Толщина металла, мм | $d_{эл}$ , мм | $I_c$ , А | $U_d$ , В |
|---------------------|---------------|-----------|-----------|
| 4                   | 4             | 180...200 | 26...30   |
| 6                   | 5             | 280...300 | 28...32   |
| 8                   | 6             | 300...320 | 30...34   |
| 10                  | 6             | 320...380 | 30...34   |
| 12                  | 8             | 350...450 | 32...36   |
| 14                  | 8             | 400...450 | 32...36   |
| 16                  | 8             | 400...450 | 32...36   |
| 18                  | 8...10        | 450...500 | 32...36   |
| 20                  | 8...10        | 500...550 | 32...36   |

***Аргонодуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом с подачей присадочной проволоки (TIG)***

Аргонодуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом с подачей присадочной проволоки (TIG) – наиболее распространенный способ сварки, применяющийся для изготовления сварных конструкций из алюминиевых сплавов ответственного назначения. Основным преимуществом процесса дуговой сварки вольфрамовым электродом в среде защитного газа является отсутствие шлаковых включений, возможность работы на малых токах дуги (от 10 А), возможность сварки тонких листов, включая фольгу, высокая устойчивость горения дуги во всем диапазоне токов, технологичность процесса. Благодаря этому процесс широко используется при сварке алюминия и его сплавов.

При аппаратурном оснащении процесса наиболее широко в промышленности применяются стандартные аргонодуговые установки с возможностью использования переменного тока. В России такие установки носят общее название УДГУ (-251, -351, -501 и др.) Эти установки построены, как правило, по одному принципу. Свар-

ка ведется на переменном токе, управление тиристорное, имеется регулировка скорости нарастания и снижения тока, полярности базового тока (регулировка проплавляющей и очищающей способности). Основной проблемой является синхронизация осциллятора и тока дуги, которая заключается в том, чтобы осциллятор генерировал высокочастотные импульсы в момент прохождения тока дуги через ноль. Сама по себе эта проблема решается достаточно просто, но возникают технические трудности, связанные с влиянием осциллятора на блок управления тиристорами. Для устранения этого нежелательного эффекта приходится выстраивать несколько каскадов дополнительных LC-фильтров, которые снижают надежность установки в целом. С работой установок типа УДГУ на постоянном токе таких проблем не возникает. В последнее время широко применяются инверторные источники питания как зарубежного, так и российского производства.

Сварка алюминия на постоянном токе вызывает значительный интерес, однако в настоящее время находится в стадии исследований и лабораторных образцов.

В качестве аргонодуговых горелок используют широкий спектр оборудования. Среди российских горелок наиболее распространены горелки фирмы «Агни» (г. Северодвинск), горелки завода «Электрик» (г. Санкт-Петербург). Среди западных горелок наиболее распространены горелки фирмы Abicor Binzel (Германия). Как правило, для токов до 250 А выпускаются горелки с газовым охлаждением, а свыше 250 А – с водяным.

При сварке на обратной полярности требуется замена электрода на медный и использование аргона в качестве защитного газа, так как использование вольфрамового анода резко снижает срок его службы. Из зарубежных фирм наиболее активно ведет работы в этом направлении немецкая фирма Abicor Binzel. На выставке в Эссене в 2001 г. был представлен лабораторный вариант горелки для механизированной сварки алюминия и его сплавов на постоянном токе обратной полярности. Это псевдоплазменная горелка с заглубленным в медное водоохлаждаемое сопло медным водоохлаждаемым анодом конической формы. Максимальный ток этой горелки составляет 150 А. Зажигание электрической дуги осуществляется

бесконтактным методом. В качестве источника питания используется любая аргонодуговая установка с напряжением холостого хода не менее 90 В, крутопадающей вольт-амперной характеристикой и имеющая осциллятор.

Среди российских фирм наиболее активно работы по сварке алюминия и его сплавов на постоянном токе обратной полярности совместно ведутся в АО НПФ «ИТС» и ВА МТО МО РФ, г. Санкт-Петербург. Проводится технологическая проработка вопроса свариваемости алюминия и его сплавов на постоянном токе обратной полярности при использовании аргона в качестве плазмообразующего газа. Для нагрева горелки разработана ручная псевдоплазменная горелка с алюминиевым соплом контактного охлаждения и коническим водоохлаждаемым анодом. Габариты и вес горелки соответствуют средним размерам аргонодуговых водоохлаждаемых горелок. Зажигание дуги может осуществляться контактным (с помощью специального приспособления) или бесконтактным методом. В качестве анода используется медный конический водоохлаждаемый анод. Стабилизация анодного пятна дуги достигается за счет запрессовки в меньшую торцевую поверхность анода вольфрамовой вставки (термическая стабилизация) или выполнения в этой области анода сферического заглубления (газодинамическая стабилизация). Максимальный ток горелки 300 А. В качестве источника питания используется ВД-306ДК и блок БУСП-ТИГ.

### ***Сварка вольфрамовым электродом переменным***

Питание дуги осуществляется переменным током от источников с падающими внешними характеристиками. Существует мнение, что аргонодуговую сварку необходимо производить на штыковых или крутопадающих внешних вольт-амперных характеристиках. Это обусловлено тем, что в указанном случае минимален пусковой бросок тока, что резко улучшает свойства сварного соединения. Переменный ток дуги при сварке алюминия обеспечивает разрушение окисной пленки. Для повышения стабильности горения электрической дуги и эффективного разрушения окисной пленки вместе с падающей внешней характеристикой источника и постоянной работой осциллятора используют дополнительную индуктивность

(дроссель) в цепи дуги, которая не позволяет погаснуть электрической дуге за счет ЭДС самоиндукции. Осцилляторы выполняют две функции – бесконтактное зажигание электрической дуги и стабилизацию сварочного тока в момент прохождения через ноль специальными стабилизаторами, синхронизированными со сварочным током и включенными, как правило, параллельно электрической дуге. Электрическая дуга горит между изделием и неплавящимся вольфрамовым электродом. Для повышения стабильности горения электрической дуги рекомендуется затачивать конец вольфрамового электрода. Симметричность тока обеспечивает равную проплавляющую и очищающую способность электрической дуги. Это самый простой и распространенный способ аргонодуговой сварки. Максимальный сварочный ток выбирают в зависимости от диаметра вольфрамового электрода по эмпирической формуле

$$I_{\text{св}} = (60...65)d_{\text{эл}}, \text{ А.}$$

Надежность защиты сварочной ванны в процессе сварки определяется диаметром и формой сопла горелки. Сварка неплавящимся электродом диаметром 2...6 мм целесообразна для алюминия и его сплавов толщиной до 10 мм.

Для аргонодуговой сварки алюминиевых сплавов неплавящимся вольфрамовым электродом выпускаются установки УДГ-180, УДГУ-251АС/DC, УДГУ-351АС/DC, УДГУ-501АС/DC.

#### ***Сварка вольфрамовым электродом переменным асимметричным током***

По сравнению с аргонодуговой сваркой симметричным током с использованием неплавящегося электрода, сварка алюминиевых сплавов асимметричным током расширяет технологические возможности за счет регулирования параметров тока прямой и обратной полярности. Как правило, регулировка асимметричности осуществляется в пределах 30 % от амплитудного значения параметра. Преобладание составляющей тока прямой полярности приводит к увеличению глубины проплавления и скорости сварки, а также к повышению стойкости вольфрамового электрода. Преобладание тока обратной полярности улучшает очистку свариваемого металла от окисной пленки и повышает качество формирования шва. Выбор правильного режима сварки в этом случае является задачей технолога.

Характеристиками асимметричного тока являются сила тока прямой и обратной полярности, а также коэффициент асимметрии  $k_{ac}$ , определяемый отношением среднего значения составляющей тока прямой  $I_{пр.ср}$  полярности к сумме средних значений токов прямой и обратной  $I_{обр.ср}$  полярностей:

$$k_{ac} = I_{пр.ср} / (I_{пр.ср} + I_{обр.ср}).$$

Для аргонодуговой сварки алюминиевых сплавов неплавящимся вольфрамовым электродом с применением переменного асимметричного тока используются установки УДГУ-351АС/ВС и УДГУ-501 АС/DC.

Единственной целью положительной полуволны является удаление оксидной пленки с поверхности металла. Температура электрической дуги поддерживается на 70 % за счет положительного полупериода тока и лишь на 30 % за счет отрицательного. Широкая положительная полуволна перегревает вольфрамовый электрод, вызывает необходимость использования электродов большего размера, требует применения более мощных и тяжелых горелок и большего расхода хладагента.

Возможности источников питания поддерживать стабильную дугу уменьшаются, когда оксидный слой удален на значительной площади материала. Поджиг дуги происходит на положительной полуволне, и в случае срыва дуги повторный поджиг становится затруднительным при отсутствии оксидной пленки на поверхности материала. Все эти проблемы часто возникают в процессе традиционной TIG-сварки переменным током.

***Система динамического оксидного контроля  
от компании Migatronik для TIG-сварки***

Система динамического оксидного контроля (D.O.C.®) сварочного процесса — запатентованная система от компании Migatronik. Она в процессе TIG-сварки автоматически отслеживает необходимость очистки сварочной ванны и непрерывно регулирует энергетический вклад в положительную полуволну. Система D.O.C. сужает положительную полуволну до необходимого значения и гарантирует максимально возможное энерговложение в отрицательную, необходимую для процесса сварки (рис. 4.5). Так как вольфрамовые элект-

троды подвергаются разрушающему воздействию в процессе очистки поверхности, система D.O.C. также предусмотрительно снижает износ вольфрамовых электродов. Улучшенные условия поджига и повышенная стабильность дуги способствуют повышению качества сварки и комфорта в работе сварочного персонала. Система D.O.C. позволяет повысить скорость сварки, снизить энергопотребление и уменьшить расход вольфрамовых электродов.

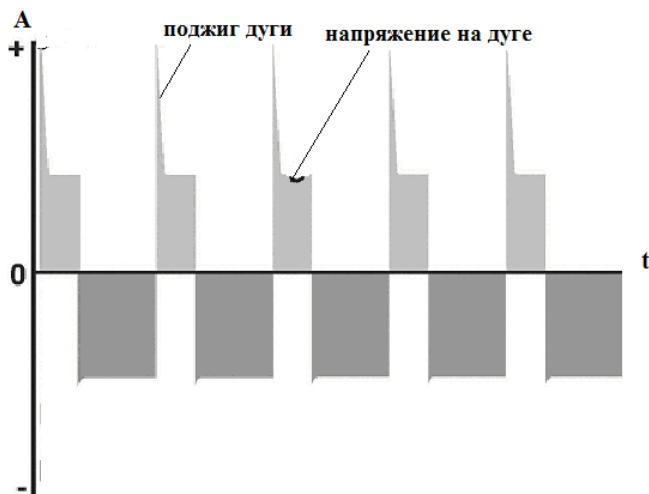


Рис. 4.5. Сварка переменным током прямоугольной формы

#### ***Способ газозлектрической сварки с дискретно-попеременной подачей аргона и гелия***

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

Значения силы сварочного тока и напряжения дуги периодически изменяются, а именно: при поступлении аргона в дуговой



промежуток происходит увеличение силы тока при одновременном снижении напряжения дуги, а при поступлении гелия, наоборот, при снижении силы сварочного тока напряжение увеличивается.

Для получения требуемой глубины и площади проплавления погонная энергия может быть снижена не менее чем на 20 %. Это преимущество обусловлено изменением температуры сварочной ванны при изменении состава защитной среды. При поступлении порции аргона расплавленный металл сварочной ванны имеет более низкую температуру, чем при поступлении порции гелия. Температура жидкого металла сварочной ванны колеблется с частотой изменения защитной среды. Не происходит чрезмерной сосредоточенности дугового разряда в активных пятнах из-за сравнительно малого изменения энергетических параметров режима сварки.

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

Данный способ сварки позволяет уменьшить силы поверхностного натяжения расплавленного металла, повысить его подвижность, снизить вероятность образования пор.

Производительность процесса сварки, а также прочность и пластичность сварных соединений повышаются на 30...50 % по сравнению с существующими технологиями сварки. Улучшаются и санитарно-гигиенические условия работы сварщиков и обслуживающего персонала вследствие значительного сокращения выделений вредных аэрозолей и озона. При сварке алюминиевых сплавов,

легированных литием и скандием, не требуется применения специальных мер защиты для обеспечения безопасной работы.

### *Импульсная сварка вольфрамовым электродом*

В ряде случаев целесообразно использовать сварку вольфрамовым электродом импульсной дугой. Подача импульсов осуществляется, как правило, с частотой до 50 или свыше 100 Гц, и эти импульсы накладываются на базовое напряжение на дуге. Импульсы имеют остроугольную или прямоугольную форму и служат для оптимального формирования сварного шва и эффективного удаления окисной пленки. Наиболее часто такие импульсы применяются при сварке тонколистового металла. Для сварки в импульсном режиме выпускаются приставки к установкам УДГУ-351АС/DC и УДГУ-501АС/DC. Пульт пульсирующей сварки ППС-01 позволяет регулировать максимальное и минимальное значения импульсов тока, а также их продолжительность. В стандартном исполнении он позволяет регулировать частоту следования импульсов от 10 до 30 Гц. Это обеспечивает снижение вероятности прожогов свариваемого металла и улучшает формирование сварного соединения.

В последнее время появились инверторные сварочные источники с частотой сварочного напряжения и тока в несколько десятков килогерц и возможностью наложения дополнительных импульсов с регулируемой амплитудой и скважностью, для чего используется приставка, аналогичная пульту ППС-01. Это источники питания Faltig-350, -400 (OZAS, Польша), Aristotig (ESAB, Швеция). Аргодуговая сварка на повышенной частоте обеспечивает высокую эффективность разрушения окисной пленки. В совокупности с наложением дополнительных импульсов это обеспечивает улучшение формирования сварного шва. Принципиальное отличие от отечественных установок типа УДГУ заключается в том, что сварка ведется на повышенной частоте, и поэтому горение дуги более стабильно. Другим отличием от отечественных установок является то, что схема управления выполнена на более современной элементной базе и использование мощных осцилляторов не приводит к влиянию на параметры сварочного режима. Поэтому в импортных установках, особенно в Faltig-350, -400 допускается использование горелки со

шлангами-токоподводами длиной до 18 м. Это наиболее эффективно при сварке длинномерных конструкций, когда имеется значительное удаление источника от места сварки.

### *Плазменная сварка*

Плазменная сварка является дальнейшим развитием и усовершенствованием аргонодуговой сварки вольфрамовым неплавящимся электродом. Плазменная сварка — это сварка плавлением, при которой нагрев производится сжатой дугой; ее столб сжат с помощью сопла плазменной горелки, потока газа или внешнего электромагнитного поля. Промышленное развитие получили сварочные плазменные горелки, где стабилизация и сжатие дуги осуществляется с помощью сопла плазменной горелки и потока плазмообразующего газа.

При свободном горении дуги температура столба достигает 5000...6000 К, и столб дуги имеет форму усеченного конуса (рис. 4.6, *а*). При ограничении возможности свободного расширения температура дуги возрастает. Кроме того, при сжатии столб дуги принимает практически цилиндрическую форму (рис. 4.6, *б*), стабилизируется анодное пятно на изделии, тепловой поток становится более сосредоточенным, глубина проплавления возрастает, снижается нагрев основного металла, прилегающего к шву.

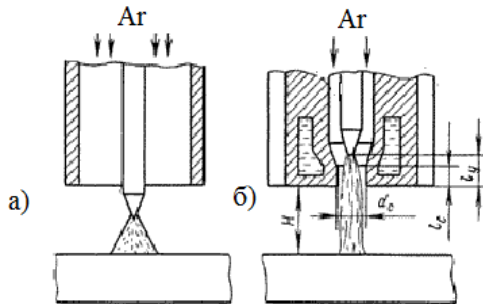


Рис. 4.6. Схемы сопловых частей аргонодуговой (*а*) и плазменной (*б*) горелок

Сжимающее дугу сопло, через которое проходит плазма, имеет два важных размера — диаметр выходного отверстия  $d_c$  и длину  $l_c$ . Расстояние, на котором установлен электрод от выходного отверстия

сопла, называется углублением электрода  $l_y$ , а расстояние между внешней поверхностью (торцом) сопла и свариваемым изделием – рабочим расстоянием  $H$ . Рекомендуется длину цилиндрической части сопла  $l_c$  выполнять в диапазоне  $(0,5...2)d_c$ .

По сравнению с аргонодуговой сваркой неплавящимся вольфрамовым электродом плазменная сварка имеет следующие преимущества:

- меньшее влияние возможного изменения расстояния от торца сопла до изделия на геометрические размеры зоны проплавления;
- меньшее влияние изменения тока на форму дуги, а следовательно, и на стабильность проплавления металла;
- высокую надежность зажигания дуги благодаря дежурной дуге;
- отсутствие включений вольфрама в сварном соединении;
- повышенную скорость сварки;
- меньшее тепловложение и, следовательно, коробление изделий.

При одинаковой скорости сварки плазменная сварка требует тока в два раза меньше по сравнению с аргонодуговой сваркой, сварные швы более узкие и с уменьшенной зоной термического влияния, благодаря чему уменьшается деформация конструкций. Недостатком плазменной сварки является то, что применяются водоохлаждаемые плазменные горелки и значительно усложняется и удорожается оборудование.

Плазменная сварка алюминия и его сплавов в связи с необходимостью разрушения и удаления окисной пленки выполняется сжатой дугой постоянного тока обратной полярности. Электрод в такой горелке служит анодом.

Для плазменной сварки алюминия применяют установки типа УПС-301 (токи до 300 А) и УПС-501 (токи до 500 А). В последнее время наиболее часто применяют источник питания ВД-306ДК или ВД-506ДК и приставку БУСП-ТИГ для аргонодуговой сварки, которая служит для подключения плазменной горелки, регулировки тока дежурной дуги, базового тока, скорости нарастания-снижения базового тока, времени продувки до и после сварки и времени горения дежурной дуги после выключения основной сварочной дуги.

В качестве плазменной горелки часто применяли плазматрон типа ПС-3, конструкция которого допускает использование медного

или вольфрамового электродов. Плазмотрон разработан СПбГТУ, выпущался заводом «Электрик» (г. Санкт-Петербург).

### *Механизированная аргонодуговая сварка плавящимся электродом*

Механизированную сварку плавящимся электродом применяют для получения стыковых, тавровых, нахлесточных и других соединений алюминия и его сплавов толщиной 4...6 мм и более. Этот способ является самым производительным среди ручных видов сварки. За границей это наиболее распространенный вид сварки алюминия.

Отличиями механизированной сварки алюминия от традиционной механизированной сварки сталей являются:

- использование аргона в качестве защитного газа;
- использование тефлоновых подающих каналов вместо стальных;
- применение специальной формы роликов в подающем механизме;
- применение специальных мундштуков на горелках.

Электрическая дуга при этом способе сварки горит между изделием и плавящимся электродом (проволокой), который подается в зону дуги обычно с постоянной скоростью.

Надежное разрушение пленки окислов при механизированной сварке плавящимся электродом достигается лишь при питании дуги постоянным током обратной полярности. Механизм удаления окисной пленки в этом случае заключается в эффекте катодного распыления.

Недостатком способа сварки алюминия плавящимся электродом является некоторое снижение показателей механических свойств по сравнению со сваркой неплавящимся электродом. Кроме того, хуже происходит удаление окисной пленки, поскольку при аргонодуговой механизированной сварке постоянным током сварочный процесс сопровождается короткими замыканиями, в момент которых катодное распыление отсутствует.

Для устранения этих недостатков в сварочной установке ВД-306ДК применено принципиально новое техническое решение: низковольтная постоянная подпитка сварочной дуги напряжением 10...11 В, которая накладывается на общую картину сварочного напряжения.

Установки для механизированной сварки состоят из выпрямителя и механизма подачи проволоки со специальными роликами.

Конструкция механизма подачи должна обеспечивать надежное и стабильное поступление мягкой алюминиевой проволоки. Обычно в таких механизмах предусматривают две пары специальных ведущих и прижимных роликов, что уменьшает возможность проскальзывания проволоки и ее смятия.

### *Механизированная импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом*

Повысить качество металла шва алюминиевых сплавов удастся применением техники управляемого переноса металла при импульсно-дуговой сварке.

Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом отличается от обычной тем, что на постоянный ток обратной полярности, получаемый от основного источника питания, накладываются кратковременные импульсы тока с определенной частотой (как правило, 50 или 100 Гц). Импульсы генерируются импульсным устройством для получения мелкокапельного направленного переноса электрода металла через дугу при более низких значениях сварочного тока, чем это имеет место при естественном мелкокапельном переносе. Величину и длительность импульсов сварочного тока выбирают такими, чтобы можно было обеспечить управляемый перенос металла с торца электрода небольшими каплями в широком диапазоне токов. Как правило, в паузах между импульсами значение тока небольшое, но достаточное для поддержания такого горения сварочной дуги, при котором ввод теплоты в изделие уменьшается и отсутствует перенос металла.

Импульсно-дуговая сварка обеспечивает повышение механических свойств наплавленного металла и сварных соединений в целом, улучшает стабильность процесса, позволяет выполнять сварку в различных пространственных положениях с улучшенным формированием швов, существенно стабилизировать провар корня шва.

Для механизированной импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом используют источник питания ВДГИ-302, который комплектуется подающим механизмом ПДИ-304.

В последние годы широкое распространение при импульсно-дуговой сварке алюминия получили инверторные установки. Наиболее характерным представителем является установка для

механизированной сварки типа Sinermig-401 (OZAS, Польша). Работа источника осуществляется на частоте 26 кГц с возможностью наложения дополнительных импульсов регулируемой амплитуды и скважности. Применение дополнительных импульсов позволяет увеличить производительность на 25 % (по данным ОАО «Адмиралтейские верфи»).

### ***Сварка трехфазной дугой неплавящимися электродами (НЭ) в среде аргона***

Чтобы повысить производительность процесса сварки и наплавки, необходим более концентрированный источник теплоты. В качестве такого источника используют трехфазную дугу, которая представляет собой факел из поочередно горящих дуг: независимой дуги, горящей между двумя вольфрамовыми электродами, и двух зависимых дуг, горящих между электродами и изделием. Минимальная проплавливающая способность дуги обеспечивается за счет уменьшенной силы тока в электродах. Межэлектродная дуга трехфазного факела поддерживает в ионизированном состоянии дуговой промежуток между изделием и электродами, позволяет подогревать деталь перед наплавкой. Трехфазная дуга обладает большей мощностью, чем однофазная.

Способ сварки трехфазной дугой имеет существенные отличия от процесса сварки однофазной дугой не только в плане электрических, мощностных характеристик и стабильности горения, но также и в плане реализации технологических возможностей. Весь опыт и проведенные исследования в области сварки трехфазной дугой в Тольяттинском политехническом институте начиная с 1970-х годов и до начала XXI века выявили широкую гамму технологических процессов соединения и разъединения металлов с помощью трехфазной аргонодуговой сварки НЭ. Разработке способов и устройств для сварки трехфазной дугой посвящено много работ В.И. Столбова, Г.М. Коротковой, В.А. Шаповалова, В.В. Ельцова, В.П. Сидорова, В.П. Потехина и других сотрудников кафедры «Сварка, обработка металлов давлением и родственные процессы». Этот универсальный инструмент может использоваться как при сварке малой толщины металла, так и при сварке алюминиевых сплавов толщиной до 40 мм; для ремонтной сварки изделий из сплавов магния и алю-

миния и автоматической сварки полотнищ и тавровых соединений; для сварки и резки алюминиевых сплавов сжатой трехфазной дугой.

Широкие технологические возможности трехфазной аргодуговой сварки обусловлены как объективным (физической природой самого процесса), так и субъективным фактором (результатом многочисленных исследований этого способа).

Замечательной особенностью горения трехфазной дуги, значительно расширяющей ее технологические возможности, является способность глубокой регулировки тока, протекающего через изделие, при неизменном значении тока в электродах. Например, устанавливая с помощью разнесения обмоток трехфазного трансформатора сварочный ток в электродах равным 100 А, можно добиться значений тока в изделии от 6 до 170 А при сохранении стабильности горения дуги во всем диапазоне изменения тока. Коэффициент тока  $K_T = I_{\text{изд}}/I_{\text{эл}}$  при этом изменяется от 0,06 до 1,7. Такая широта диапазона тока сварки в изделии обеспечивается включением в цепь средней фазы источника питания балластного реостата. Применение балластных сопротивлений для регулировки сварочного тока известно достаточно давно, но такую глубину регулирования тока не удастся получить даже при сварке на постоянном токе (из-за нарушения устойчивости горения дуги на малых токах) и тем более при сварке алюминиевых сплавов на переменном токе вольфрамовым электродом. Эффективность такого глубокого регулирования тока особенно проявляется при наплавке тонколистовых или малогабаритных конструкций из легких сплавов, где требуется строго ограниченное тепловложение. Как известно, для получения качественного сварного соединения при наплавке алюминиевых сплавов требуется удалить окисную пленку с поверхности металла, что как раз и обеспечивается малоамперной дугой (6...15 А), а тепла, выделяемого межэлектродной дугой, достаточно для образования сварочной ванны. Другие способы наплавки дугой прямого действия обеспечить такое дозированное тепловложение не могут и, соответственно, реализовать технологию наплавки тонколистовых и малогабаритных конструкций из легких сплавов не в состоянии.

Используя эффект глубокого регулирования сварочного тока в изделии, проводили наплавку на торец пакета из алюминиевых



полос толщиной 1 мм с целью получения сплошной металлической поверхности на торце шинопровода. Полученные образцы сварных соединений, выполненных трехфазной дугой с глубоким регулированием сварочного тока (рис. 4.7, *a*) и обычной трехфазной дугой с величиной  $K_T = 1,7$  (рис. 4.7, *б*), резко отличаются величиной проплавления. Во втором случае провар металла достигает толщины самого пакета пластин, при этом создается большой объем литого металла в торце шинопровода, возникают значительные деформации пластин, составляющих пакет шинопровода.

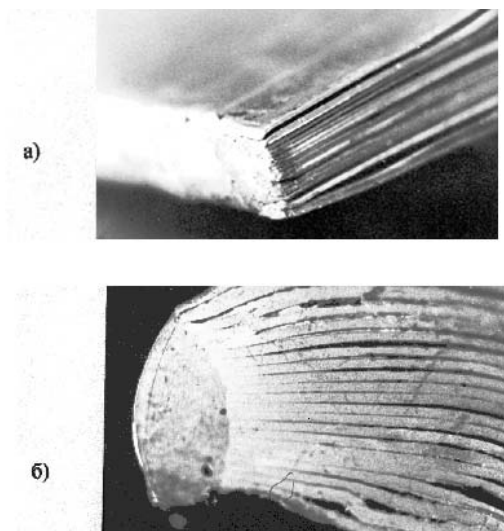


Рис. 4.7. Наплавка шинопровода трехфазной дугой НЭ в аргоне:  
*a* – коэффициент токов  $K_T = 0,5$ ; *б* –  $K_T = 1,7$

Достаточно наглядно широкие технологические возможности трехфазной дуги в среде аргона, связанные с глубоким регулированием сварочного тока в изделии, проявляются при наплавке пластин из сплава 1201 толщиной 20 мм, плакированных чистым алюминием толщиной 1 мм. Здесь требуется восстановить лишь плакирующий слой, не затрагивая металл основы. Используя трехфазную дугу с регулированием тока в изделии балластным сопротивлением, получили необходимый результат (рис. 4.8).

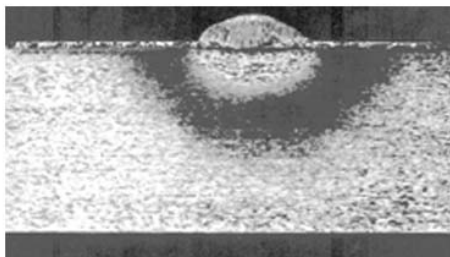


Рис. 4.8. Наплавка плакирующего слоя

Ремонтная сварка и наплавка изношенных деталей, как правило, выполняется с применением присадочной проволоки, подаваемой в сварочную ванну.

При этом присадочный материал может иметь как круглое, так и прямоугольное сечение («лапша»). Диаметр присадочной проволоки и размеры сечения лентообразной «лапши» иногда превышают размеры дугового промежутка, что затрудняет процесс наплавки, особенно в автоматическом варианте. Специфические особенности горения трехфазной дуги и конструктивное решение двухэлектродной горелки, применяемой для ремонтно-восстановительных работ, позволяют решить эту проблему за счет изменения величины дугового промежутка в первом и втором электродах (рис. 4.9).



Рис. 4.9. Характерное расположение электродов в трехфазной горелке

Исследование возможности наплавки присадочным материалом большого сечения проводили с помощью двухэлектродной горелки ГАСТ-5, источника питания трехфазной дуги УДГТ-315, методом фотосъемки процесса и металлографического анализа

наплавленных образцов. В качестве присадочного материала применяли проволоку из сплава АМг-6 диаметром 5 мм и «лапшу» из магниевого сплава МЛ5 размером 6×6 мм. Сварочная горелка была оснащена вольфрамовыми электродами марки ЭВЛ-15 диаметром 4 мм и жестко закреплена на штативе. Установочная длина дуги первого электрода составляла 8 мм, второго электрода — 4 мм. Наплавку осуществляли путем перемещения изделия, закрепленного на сварочной каретке, присадочный материал подавали вручную или укладывали на поверхность наплавляемого изделия. Значение силы тока в электродах и в изделии контролировалось приборами и составляло соответственно 110 и 180 А. В процессе проведения экспериментов установили, что стабильность горения трехфазной дуги не нарушалась, колебания параметров режима наплавки оставались в пределах нормы.

Воздействие трехфазной дуги, горящей в среде аргона между неплавящимися электродами, на поверхность металла при сварке изделий из легких сплавов подробно описано в работах В.И. Столбова и В.П. Потехина. Однако формирование наплавленного валика, особенно с подачей присадочной проволоки, имеет существенное отличие от процесса получения сварного соединения хотя бы из-за различия достижения цели по глубине провара основного материала. Кроме того, наряду с общим характером термического и силового воздействия трехфазной и однофазной дуги на поверхность металла выявлены и существенные отличия. Эти отличительные параметры позволяют при их надлежащем использовании получать совершенно иные формы сварочной ванны и наплавленного валика. Основным отличием трехфазной дуги от однофазной является наличие в факеле трехфазной дуги трех попеременно горящих отдельных дуг переменного тока, причем эти дуги различаются не только во времени, но и в пространственном измерении, образуя своеобразный треугольник с вершинами на торцах электродов и в точке пересечения осей электродов.

Силовое воздействие трехфазной дуги на сварочную ванну исследовалось В.И. Столбовым и В.П. Потехиным по специально разработанной методике. Результаты измерений показали, что общее давление трехфазной дуги пропорционально квадрату силы тока,

протекающего в детали. Коэффициент пропорциональности изменяется в более широких пределах, чем при однофазной дуге, и, что самое важное, при равенстве электрической мощности давление трехфазной дуги во всех случаях меньше, чем однофазной. Уже только этот фактор говорит о том, что с целью уменьшения глубины провара основного металла использовать для наплавочных работ трехфазную дугу более целесообразно, нежели однофазную.

Из классических представлений о воздействии сварочной дуги на свариваемый металл известно, что с увеличением длины дуги глубина провара металла шва уменьшается из-за резкого снижения удельной мощности, поступающей от дуги к изделию. Поскольку трехфазная дуга имеет другие пространственно-временные параметры, проводили исследования влияния изменения длины трехфазной дуги на формирование проплава основного металла и ее энергетические характеристики.

Исследования проводили с помощью источника питания трехфазной дуги УДГТ-312У2, сварочной горелки РГТ-6, на пластинах из алюминиевого сплава 1201 толщиной 20 мм, без применения присадочной проволоки, неподвижной дугой. Установочную длину дуги изменяли в пределах от 2 до 12 мм.

Устойчивое горение дуги и удовлетворительная защита сварочной ванны наблюдались на всём диапазоне изменения длины дуги. Отмечены прирост напряжения как на основных, так и на независимой дуге при стабильности соотношения  $U_{дн} / U_{дз}$  и повышение выделяемой мощности дуги с увеличением ее длины (рис. 4.10).

Исследуя полученные в процессе проведения экспериментов формы провара металла при различных длинах дуги, обнаружили, что с ростом напряжения и длины дуги увеличиваются глубина проплавления металла и площадь проплава. Причем при длине дуги свыше 5 мм форма провара изменяется от эллипсовидной к бочкообразной (рис. 4.11). Такое явление, противоречащее классическим представлениям, потребовало дополнительных исследований влияния трехфазной дуги на свариваемый металл.

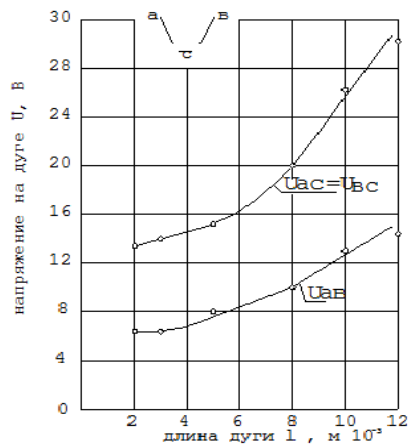


Рис. 4.10. Изменение напряжения на дугах трехфазного факела

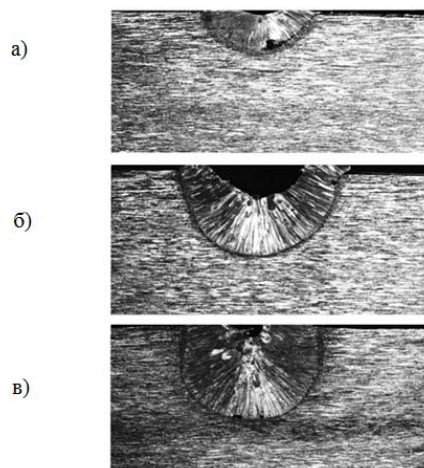


Рис. 4.11. Форма поперечного сечения сварных швов при длине трехфазной дуги: а – 2 мм; б – 5 мм; в – 10 мм

В частности, исследовали влияние длины дуги на коэффициент формы шва и проводили фотосъемку трехфазной дуги при различной установочной длине дуги. Изучая макрошлифы проплава, полученные при наплавке с различной длиной дуги (рис. 4.12), убедились, что с увеличением длины трехфазной дуги возрастает глубина провара основного металла и уменьшается коэффициент формы шва.

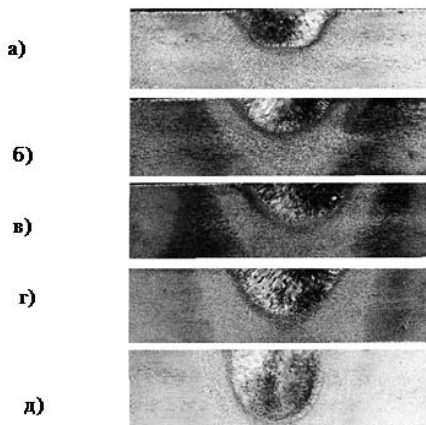


Рис. 4.12. Характерная форма проплава металла при увеличении установочной длины трехфазной дуги: *а* – 2 мм; *б* – 3 мм; *в* – 5 мм; *г* – 8 мм; *д* – 12 мм

Резкое отличие в особенностях проплавления металла для однофазного и трехфазного процессов потребовало детального рассмотрения взаимодействия дуги с нагреваемой поверхностью.

Как известно, тепловое действие дуги складывается из двух основных тепловых потоков: от электрического тока дуги в пределах активного пятна  $Q_r$  и на значительно большей площади нагретым дугой газом  $Q_f$ . Величины мощностей обоих потоков соизмеримы, а их отношение растет с ростом тока сварки.

При увеличении длины дуги и постоянстве ее тока мощность  $Q_r$ , равная произведению приэлектродного падения напряжения и дугового тока, остается неизменной, а прирост выделяемой в дуге мощности приходится на  $Q_f$ . Однако простое повышение мощности распределенного источника тепла не может вызвать наблюдаемых особенностей в проплавлении металла.

Характер изменения формы и размеров зоны проплавления свидетельствует о росте степени сосредоточенности источника тепла и его заглублинии в металл сварочной ванны. Причиной необычной эволюции теплового действия дуги при увеличении ее длины являются особенности газодинамических процессов, протекающих при горении трехфазной дуги между деталью и двумя неплавящимися электродами, расположенными в одной плоскости под углом друг

к другу. Как известно, при горении дуги со стержневого электрода соосно ему возникает устойчивый поток плазмы. В данном случае такие потоки формируются у каждого электрода. При малом расстоянии от электрода до детали эти потоки воздействуют на сварочную ванну практически отдельно и образуют в расплаве широкую, но мелкую лунку. Источники тепла  $Q_r$  и  $Q_p$ , описывающие тепловое воздействие дуги, располагаются фактически на поверхности изделия, причем  $Q_r$  распределен на большей площади, обтекаемой нагретым газом. С увеличением расстояния от торцов электродов до детали потоки с электродов, расположенных в одной плоскости, начинают взаимодействовать между собой. В области их соударения формируется зона повышенного давления и температуры, образующая в расплаве глубокий, но узкий кратер (рис. 4.13).

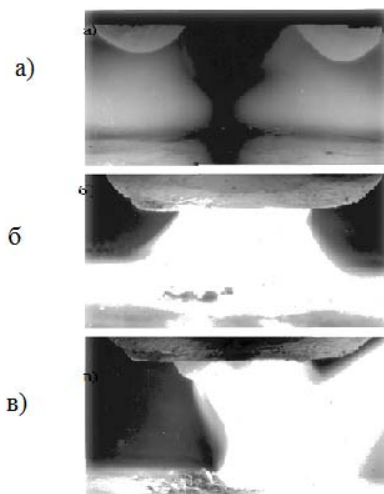


Рис. 4.13. Особенности воздействия трехфазной дуги на поверхность металла при установочной длине дуги: *a* – 2 мм; *б* – 5 мм; *в* – 10 мм

Активное пятно дуги располагается на дне кратера, так что источник  $Q_r$  оказывается заглубленным. Разогретый газ, обтекая глубокий и узкий кратер, передает тепло на меньшей в плане площади, т. е. является более сосредоточенным. Всё это обуславливает увеличение глубины проплавления и уменьшение коэффициента формы шва.

Выявленные особенности воздействия трехфазной дуги на поверхность металла позволяют дать рекомендации по технологии наплавки изделий трехфазной дугой в среде аргона НЭ, заключающиеся в том, что с целью уменьшения глубины проплавления основного металла длина дуги при наплавке не должна превышать 3 мм.

#### **4. Оценка технологичности способов дуговой сварки алюминиевых сплавов**

Электродуговая сварка алюминия является сложным процессом и требует точного поддержания параметров технологического процесса. Это обусловлено специфическими свойствами алюминия (низкая температура плавления  $T_{пл} = 660 \text{ }^\circ\text{C}$ , высокая теплопроводность ( $0,52 \text{ кал}/(\text{см}\cdot\text{с}\cdot^\circ\text{C})$ ), высокая скорость кристаллизации металла шва, высокое сродство к кислороду, высокий коэффициент линейного расширения  $\alpha = 24,58 \cdot 10^{-6}$ ). При нарушении технологии швы могут быть плохого качества. Основными дефектами являются непровары, прожоги, поры, трещины, окисные и вольфрамовые включения, а также неудовлетворительное формирование шва.

При всех видах электродуговой сварки алюминия применяют специальные технологические и конструктивные меры, способствующие удалению окисной пленки с поверхности свариваемого металла, шлаковых включений, снижению загазованности сварочной ванны, уменьшающие коробление и т. д.

Дуговая сварка алюминия и его сплавов может осуществляться всеми известными методами: ручной дуговой сварки покрытыми электродами, аргонодуговой сварки неплавящимся электродом (симметричным переменным током, асимметричным переменным током, импульсная), плазменной сварки, механизированной аргонодуговой сварки плавящимся электродом, трехфазной дугой НЭ. Особое внимание при использовании этих методов необходимо обратить на то, что сварку необходимо осуществлять на обратной полярности или переменном токе.

Общепринятое на территории стран СНГ мнение, что наиболее передовой метод сварки алюминия — это аргонодуговая сварка неплавящимся электродом на переменном токе, является не совсем правильным и вызвано несовершенством аппаратного ос-



нашения других сварочных процессов (отсутствием производства в России тефлоновых подающих каналов, специальных мундштуков, сложностью производства подающих роликов и т. д.). Метод аргонодуговой сварки на переменном токе целесообразно применять при сварке малых толщин (менее 1 мм) конструкций из алюминиевых сплавов или в труднодоступных местах. Этот метод уступает другим методам в 3...4 раза по производительности и по удельным энергозатратам процесса.

Наиболее передовым (по производительности, механическим свойствам сварного соединения, технологичности) является метод механизированной аргонодуговой сварки плавящимся электродом с применением импульсно-дуговых источников или выпрямителей (ВД-306ДК), использующих комбинированные вольт-амперные характеристики. Использование этих двух методов позволяет устранить недостатки, характерные для традиционной механизированной сварки (загрязнение металла шва окисными включениями, пористость и низкие показатели прочностных характеристик сварных соединений).

Из всех перечисленных способов сварки и наплавки наиболее перспективным можно считать сварку трехфазной дугой, так как этим способом обеспечивается минимальное вложение тепла в основной металл, стабильное горение дуги, большой диапазон регулирования тока сварки и широкие технологические возможности. Однако отсутствие промышленного выпуска оборудования для этого способа существенно ограничивает его применение.

## **5. Сварка плавлением магниевых сплавов**

Магниевые сплавы обладают рядом преимуществ. Это малый удельный вес (в 4,5 раза легче стали), хорошая обрабатываемость резанием, высокая удельная прочность и высокая демпфирующая способность.

Сплавы на основе магния бывают литейные (МЛ1, МЛ5, МЛ10) и деформируемые (МА1, МА2, МА5). В качестве легирующих и модифицирующих компонентов в сплавах магния применяют алюминий, цинк, цирконий, неодим, церий. Образующиеся интерметаллические соединения в значительной степени расширяют интервал

кристаллизации магниевых сплавов. К тому же, в отличие от алюминиевых сплавов, пластичность магниевых сплавов значительно ниже, что и обуславливает их худшую свариваемость. Высокая теплопроводность магниевых сплавов (близкая к сплавам алюминия, но несколько меньшая) приводит к большой скорости кристаллизации сварочной ванны и высокой скорости охлаждения сварного соединения, что обуславливает значительный темп деформации металла в эффективном интервале кристаллизации, а значит, снижает технологическую прочность сварных соединений. Высокая теплопроводность металла требует применения для сварки мощных и концентрированных источников энергии.

### *Трудности при сварке*

Магний энергично окисляется на воздухе с образованием пленки окисла. Однако, в отличие от окисной пленки на поверхности алюминия, MgO не предохраняет изделие от проникновения кислорода внутрь металла. Окисная пленка MgO характеризуется высокой температурой плавления, которая составляет около 2825 °С, тогда как температура плавления магния около 500 °С. Удельный вес магния 1540 кг/м<sup>3</sup>, пленки — 3300 кг/м<sup>3</sup>. Пленка окисла магния препятствует сплавлению свариваемых кромок, а при попадании в сварочную ванну вызывает пористость шва и может быть концентратором напряжений.

Вторая трудность при сварке магниевых сплавов — образование кристаллизационных трещин. Особенно низка технологическая прочность сварных соединений, получаемых при заварке дефектов магниевом литья. Это обусловлено, во-первых, малой пластичностью самого сплава, а во-вторых, наличием в литой детали остаточных напряжений и жесткостью самой конструкции. Все это усиливает склонность к образованию горячих трещин.

### *Методы борьбы с трещинообразованием*

Все существующие методы повышения технологической прочности сварных соединений основаны на реализации идей, заложенных в теории технологической прочности, разработанной рядом авторов школы МГТУ им. Н.Э. Баумана. Эти методы можно условно разделить на технологические и металлургические.

К **металлургическим** способам снижения трещинообразования при сварке относят:

1) повышение пластичности сплава в период кристаллизации путем модификации сварного шва тугоплавкими элементами. Повышение пластичности сплава происходит здесь за счет измельчения зерна твердого раствора;

2) повышение пластичности сплава за счет увеличения количества эвтектической составляющей путем введения в сварочную ванну дополнительного количества легирующих компонентов;

3) повышение пластичности сплава путем создания измельченной двух- или трехфазной структуры за счет введения в сварочную ванну легирующих элементов, не входящих в данную систему легирования;

4) сужение температурного интервала хрупкости (ТИХ) связыванием легкоплавких примесей в более тугоплавкие соединения с помощью специальных технологических добавок в сварочную ванну или повышением чистоты свариваемого и присадочного металла;

5) сужение ТИХ за счет введения в сварной шов элементов, образующих с металлом основы интерметаллические соединения эвтектического типа. Температура их плавления должна быть близкой к температуре плавления твердого раствора.

К **технологическим** приемам, позволяющим снизить вероятность появления горячих трещин, относятся:

- снижение темпа деформации металла в области ТИХ при кристаллизации сварочной ванны. Темп деформации снижается путем уменьшения скорости охлаждения сварочной ванны за счет использования предварительного подогрева изделия перед сваркой;
- снижение темпа деформации металла в области ТИХ за счет оптимизации параметров режима сварки, обеспечивающих наперед заданную тепловую ситуацию в зоне шва и околошовной зоне;
- повышение пластических свойств кристаллизующегося сварного шва путем измельчения структуры и изменения направления роста кристаллитов за счет введения присадочного материала в хвостовую часть сварочной ванны;
- повышение пластичности металла в области ТИХ за счет измельчения растущих кристаллитов механическими или ультразвуковыми колебаниями;

- повышение пластических свойств кристаллизующегося металла путем измельчения структуры резким переохлаждением расплавленного металла, например, метод намораживания.

Сплавы магния подвержены коррозии. Для повышения коррозионной стойкости поверхность изделий покрывают искусственной хроматной защитной пленкой.

При сварке магниевых сплавов необходимо тщательно очистить поверхность металла от окисной и защитной пленок. Очистку можно производить механически — при помощи щеток и наждачной бумаги — и химическим путем. Сначала производится обезжиривание детали в течение 4...5 секунд в щелочи, затем удаляется пленка в 18-процентном растворе хромовой кислоты при 90...100° в течение 5 минут. После травления производится промывка в горячей и холодной воде.

### ***Способы сварки изделий из магниевых сплавов***

Один из наиболее ранних способов заварки дефектов магниевых отливок — сварка с помощью газовой горелки с использованием фторидных флюсов и присадочного материала основного состава. Широкие технологические возможности газового пламени сводятся на нет трудностями удаления флюсов после сварки и резким снижением коррозионной стойкости сварных соединений. Кроме того, существует опасность возгорания ремонтируемого изделия.

Исправление дефектов отливок из сплавов МЛ5, МЛ9, МЛ10 рекомендуется производить аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом на переменном токе с использованием общего или местного предварительного подогрева. Для подварки применяют присадочный металл того же состава, что и основной металл в виде прессованных прутков диаметром 3...8 мм. Перед заваркой дефектный участок разделяют пневмошарошкой и производят зачистку поверхности изделия от окислов и литейной корки на расстояние 15...20 мм от границы разделки. После этого со стороны корня шва устанавливают гладкие стальные либо медные подкладки или лист асбеста и изделие подогревают до температуры 250...380 °С. Нагрев обычно осуществляют в печах или пламенем газовой горелки. Однако получить стабильно высокое качество ремонта отливок при этом способе не удастся из-за

несплавления кромок в корне шва и трещин в усадочном кратере. Кроме того, предварительный подогрев не всегда возможно использовать, например при ремонте механически обработанного изделия. Хорошие результаты получаются при использовании для магниевых сплавов способа сварки трехфазной дугой неплавящимися электродами в среде аргона. Широкие технологические возможности этого способа позволяют проводить сварку и получать сварные соединения с высокой технологической прочностью, даже при условии отсутствия общего подогрева изделия.

## **Тема 13. Сварка цветных металлов и сплавов**

### *Учебные вопросы*

1. Особенности сварки титановых сплавов.
2. Сварка меди.
3. Сварка бронзы.
4. Сварка латуни.

### **1. Особенности сварки титановых сплавов**

Титановые сплавы – перспективный материал для производства сварных конструкций в области машиностроения, поскольку они имеют два основных преимущества по сравнению с другими конструкционными материалами:

- 1) высокую удельную прочность (прочность, отнесенная к удельному весу) вплоть до температур 450...500 °С. Прочность некоторых титановых сплавов достигает 1200...1400 МПа, удельный вес – 4500 кг/м<sup>3</sup>;
- 2) отличную коррозионную стойкость и нейтральность ко многим агрессивным средам (выше, чем у нержавеющей стали) при температуре до 200 °С.

Титановые сплавы нашли широкое применение в летательных аппаратах, химической аппаратуре, транспорте и судостроении.

Технически чистый титан находит ограниченное применение в радиоэлектронике. Технический титан содержит примеси внедрения – кислород, азот, водород, которые повышают прочность и понижают пластичность и вязкость металла. Легирование титана

позволяет получать свариваемые сплавы, обладающие повышенной прочностью при достаточной пластичности и вязкости.

Все сплавы титана в зависимости от легирующих элементов делятся на три группы:  $\alpha$ -сплавы,  $\beta$ -сплавы, ( $\alpha + \beta$ )-сплавы.

Альфа-сплавы (BT-1, BT-2, BT-5), легированные алюминием, кремнием и марганцем, не изменяют кристаллического строения титана. Такие элементы, как Al, Si, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, при добавлении в титан сохраняют при нормальной температуре высокотемпературную  $\alpha$ -фазу.

Бета-сплавы (BT-15) легированы молибденом, никелем и хромом –  $\beta$ -стабилизаторами. Изменяя в сплаве количество  $\alpha$ -стабилизаторов и  $\beta$ -стабилизаторов можно получить двухфазный ( $\alpha + \beta$ )-сплав (OT-4, BT-14).

Технически чистый титан и однородные  $\alpha$ -сплавы титана не упрочняются в процессе термообработки. Двухфазные сплавы и  $\beta$ -сплавы титана воспринимают упрочняющую обработку (закалка, последующий отпуск, старение).

Прочность таких металлов после термообработки может быть доведена до 1400 МПа и более при удовлетворительной пластичности и вязкости. Большим недостатком сплавов на основе титана является их высокая стоимость.

Таблица 4.2

Основные трудности при сварке титановых сплавов

| № | Трудность                           | Сущность   | Меры борьбы  |
|---|-------------------------------------|--|--|
| 1 | Высокая химическая активность       | Поглощение водорода и окисление при нагреве сплавов выше температуры 200 °С  | Защита сварочной ванны, околовольной зоны и корня шва инертным газом, вакуумом, специальными флюсами |
| 2 | Реакция металла на термический цикл | Рост зерна на участке перегрева, аллотропические превращения при T = 882°, при охлаждении наблюдаются закалочные явления в шве и ОШЗ, выпадение интерметаллидов, что вызывает охрупчивание сварного соединения | Выбор оптимальных методов сварки и режимов сварки на минимальной погонной энергии                    |

| № | Трудность   | Сущность   | Меры борьбы  |
|---|---|--|--|
| 3 | Порообразование   | Возбудитель пористости – водород. Уменьшение растворимости водорода в твердом металле по сравнению с жидким состоянием приводит к выделению водорода при кристаллизации сварного шва | Тщательная зачистка поверхности кромок и присадочного материала. Механическая обработка, пескоструйная обработка, травление. Вакуумный отжиг присадочного материала для снижения содержания водорода до 0,002...0,004 %. Сварка под фторидными флюсами |
| 4 | Склонность к задержанному разрушению (холодные трещины) | Повышенное содержание газов плюс внутренние напряжения. Водород выделяется из твердого раствора с образованием гидридов, являющихся концентраторами напряжения                       | Меры борьбы такие же, как и для борьбы с пористостью   |

### ***Технологические особенности сварки титановых сплавов***

1. Из-за малой теплопроводности титана количества теплоты на образование сварного соединения в целом требуется меньше, чем при сварке малоуглеродистой стали. По параметрам режима сварка титановых сплавов близка к сварке аустенитной стали.

2. Титан не магнитен, поэтому нет опасности магнитного дугтя, но в тоже время нельзя применять для сварки магнитные стелды.

3. В расплавленном состоянии титан жидкотекуч и обладает высоким коэффициентом поверхностного натяжения. Вследствие этого сварные соединения склонны к прожогам, и поэтому к сборке стыков предъявляются более жесткие требования, чем при сварке других конструкционных материалов.

### ***Подготовка металла под сварку***

Резка титана ведется обычно механическим путем. Газовая резка используется как предварительная, так как кромки металла насыщаются газами, и этот слой необходимо удалять.

Типы разделок кромок для сварки титановых сплавов такие же, что и для сварки стали. Более жесткие требования предъявляются

к величине зазора; лучше, если зазор отсутствует. Перед сваркой производится механическая зачистка кромок на ширину 20 мм от оси стыка, и непосредственно перед сваркой производится обезжиривание свариваемых кромок ацетоном.

### ***Способы сварки титановых сплавов***

#### *Сварка в защитных газах*

В защитных газах сваривается большая часть конструкций. Метод универсален и позволяет сваривать металл толщиной от 0,1 до 50 мм. Основная проблема при сварке – обеспечение качественной защиты, причем не только сварочной ванны, но и всего металла, нагретого до температуры 200 °С и выше.

Защита при сварке может быть:

- 1) местная, когда защищается активная зона, ограниченная изотермой 300 °С. Обязательно защищается обратная сторона шва;
- 2) общая защита изделия (камера с контролируемой атмосферой).

Для местной защиты используют:

- 1) стандартные горелки с расширенным соплом и приставками для дополнительной подачи газа;
- 2) специальные горелки с приставками (приспособления типа пухырька);
- 3) при сварке стыков труб – вращающиеся микрокамеры (могут быть жесткие и полиэтиленовые).

Для защиты обратной стороны шва (корня шва) используют:

- а) поддув газа через отверстия в технологической подкладке;
- б) метод продувки, но только для замкнутых изделий (трубы) при диаметре трубы не более 100 мм, так как в противном случае слишком велик расход аргона;
- в) метод заполнения объема. Для продувки объема изделия пропускают двукратный объем аргона, заполняют объем изделия инертным газом, а затем производят сварку швов;
- г) наклеивание на корень шва оболочки из эластичного материала, в которую вдувается аргон.

#### *Сварка с применением флюсов (АНТ-17А)*

Флюсы вводятся в зону сварки путем нанесения на кромки флюс-пасты. В качестве флюсов используют фториды и хлориды щелочных и щелочноземельных металлов. Применение флюсов



уменьшает пористость швов и снижает затраты погонной энергии. При сварке по слою флюса получаются более узкие швы при значительном увеличении глубины проплавления, что является следствием контрагирования (обжатия) дуги парами флюса. При этом уменьшаются деформации свариваемого изделия.

#### *Сварка с общей защитой изделия*

Получение качественных сварных соединений при сварке изделий сложной конфигурации с местной защитой шва затруднено. Поэтому для сварки таких изделий применяют герметичные камеры с контролируемой атмосферой инертного газа. Изготавливаются камеры различных габаритов. Для сварки громоздких изделий используются обитаемые камеры. Оператор выполняет сварку, находясь внутри камеры в специальном скафандре.

О надежности газовой защиты швов в процессе сварки и при последующем охлаждении можно судить по внешнему виду шва. Блестящая серебристая поверхность – хорошая защита. Появление цветов побежалости (радужные) свидетельствует о нарушении защиты, а серых налетов – о плохой защите. Простым критерием степени загрязнения шва служит твердость металла шва и околошовной зоны. Твердость металла шва не должна превышать твердость основного металла.

Основной метод сварки – сварка неплавящимся электродом в аргоне марки А. Электрод берут вольфрамовый, лантанированный или иттрированный. Ток постоянный, полярность прямая. Сварка производится вручную или автоматом.

Для сварки технического титана и сплавов толщиной более 1,5...2 мм применяют титановую проволоку ВТ1-00 после вакуумного отжига. Более стабильное качество сварных швов получается при автоматической сварке.

Для сварки титановых сплавов малой толщины (менее 1,5...2 мм) находят применение импульсно-дуговая сварка неплавящимся электродом. При длительности импульса 0,2...0,3 с и паузы 0,1...0,2 с удается получить сварной шов в виде сварных точек, перекрывающих друг друга на 1/3 диаметра. При этом снижается перегрев металла, уменьшаются сварочные деформации, сохраняется герметичность стыка, и несколько повышается пластичность швов.

Сварка погруженной дугой позволяет за один проход сваривать металл толщиной 10...12 мм без разделки кромок. Недостатки такого способа — чрезмерная ширина шва и большие размеры околошовной зоны.

Сварка плавящимся электродом производится постоянным током обратной полярности на режимах, обеспечивающих мелкокапельный перенос металла. Диаметр проволоки составляет от 2 до 5 мм в зависимости от толщины свариваемого металла. При сварке в монтажных условиях в различных пространственных положениях применяется импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом в среде аргона. Производится полуавтоматическая сварка проволокой диаметром 1,2...2,0 мм с питанием от генератора импульсов (ИИП-2), обеспечивающего перенос одной капли металла при каждом импульсе тока. При этом уменьшается разбрызгивание электродного металла.

При автоматической и механизированной сварке титановых сплавов необходимы более мощные механизмы подачи проволоки, так как титан имеет большой коэффициент трения. Требуется также более жесткий контроль величины вылета электрода: он должен составлять 10...12 мм. При увеличении вылета электрода происходит его перегрев, поскольку титан имеет малый коэффициент теплопроводности и высокое электросопротивление.

Для сварки титановых сплавов толщиной более 3 мм применяется способ сварки под слоем флюса, разработанный ИЭС им. Е.О. Патона.

Из-за большой химической активности металла при высоких температурах к флюсу для сварки титана предъявляются особые требования. Флюс должен обеспечить надежную защиту зоны сварки от воздуха и не оказывать окислительного действия на металл шва. Важно, чтобы флюс предохранял шов от загрязнения водородом. Флюс должен быть тугоплавким. Этим требованиям удовлетворяют бескислородные фторидо-хлоридные флюсы сухой грануляции.

Сварка ведется на постоянном токе обратной полярности на остающейся подкладке, на медной технологической подкладке или на флюсовой подушке.

Сварка на флюсовой подушке обеспечивает более мелкозернистую структуру сварного шва, что объясняется модифицирующим действием флюса.

### *Электрошлаковая сварка титана*

Способ рекомендуется при сварке металла толщиной свыше 30...40 мм. Используется тугоплавкий бескислородный флюс АН-Т2. Однако при ЭШС титановых сплавов одной шлаковой защиты недостаточно, и шов загрязняется газами. Поэтому дополнительно над поверхностью шлаковой ванны осуществляется газовая защита аргоном, а также подается аргон через отверстия в ползунах. При длине шва 200...250 мм сварка ведется пластинчатым электродом, при большей длине – плавящимся мундштуком или проволоками.

## **2. Сварка меди**

Применяемые марки меди для сварных конструкций: М0, М1, М2, М3, М4. Техническая медь обладает высокой электропроводностью, теплопроводностью, коррозионной стойкостью, хорошо обрабатывается. Температура плавления меди 1083 °С. Коэффициент теплопроводности меди почти на порядок выше, чем у стали.

Медь нечувствительна к низким температурам, с понижением температуры сохраняется ее высокая пластичность.

Наиболее вредное влияние из примесей на свойства меди оказывают кислород, водород, висмут и сурьма.

Кислород растворим в жидкой меди в виде закиси меди  $\text{Cu}_2\text{O}$ , а в твердой меди практически нерастворим.  $\text{Cu}_2\text{O}$  дает с медью легкоплавкую составляющую (эвтектику), которая, сосредоточиваясь по границам кристаллитов, снижает стойкость металла шва против кристаллизационных трещин. В меди, предназначенной для сварных конструкций, содержание кислорода не должно превышать 0,03 %, для ответственных изделий – 0,01 %.

Водород растворим как в жидкой, так и в твердой меди. При переходе меди из твердого состояния в жидкое растворимость водорода увеличивается в 4 раза. Особенно отрицательное действие водород оказывает на медь, содержащую кислород. Водород, легко проникающий в медь, при повышенных температурах реагирует с кислородом закиси меди с образованием водяных паров, что вызывает водородную болезнь меди – большое число мелких разрывов кристаллической решетки и, как следствие, появление микротрещин.

Висмут, сурьма, сера значительно снижают стойкость меди против трещин, снижают ее пластичность.

Вследствие высокой теплопроводности меди для ее сварки необходимы мощные источники тепла с высокой степенью концентрации тепловой энергии, и еще дополнительно необходим предварительный и сопутствующий подогрев.

Высокий коэффициент линейного расширения (в 1,5 раза больше, чем у стали) вызывает необходимость применения дополнительных мер против коробления конструкций.

#### ***Ручная сварка меди угольным или графитовым электродом***

Этот способ целесообразно применять при изготовлении конструкций из листовой меди небольшой толщины (1...10 мм); медь толщиной 1...3 мм следует сваривать с отбортовкой, металл большей толщины – с присадкой. В качестве присадки применяют прутки из меди М1, М2 или из сплавов меди, содержащих раскислители (Р, Мп, Si). Наиболее часто применяют присадочные прутки из бронзы БрОФ9-03 и БрКМц3-1; в качестве флюса применяют борный шлак – 95 % прокаленной буры и 5 % магнезия металлического в порошке.

Флюсы наносят на смоченную жидким стеклом поверхность прутка или на свариваемые кромки. Перед нанесением флюса кромки и прутки должны быть тщательно очищены от загрязнений механическим путем или 10-процентным раствором каустической соды.

Металл толщиной более 5 мм сваривается с разделкой кромок 70...90°, стыковые швы свариваются на графитовой или асбестовой подкладке с зазором не более 0,5 мм.

Сварка ведется на постоянном токе прямой полярности, длиной дугой 35...40 мм, напряжение на дуге 35...45 В.

Перед сваркой листов толщиной более 6...8 мм начало шва или всё изделие подогревается до температуры 250...350 °С. После сварки рекомендуются проковка и быстрое охлаждение шва.

#### ***Ручная сварка меди металлическим электродом***

Применяется при сварке листов толщиной свыше 2 мм. Используют электроды марок «Комсомолец», ЗТ, ММ3-1, ММ3-2, которые изготавливают из меди марок М1, М2, М11 и бронзы БрКМц3. Сварка ведется на постоянном токе обратной полярности.

При сварке металла толщиной 5...10 мм применяется V-образная разделка кромок с притуплением 1,5...3 мм, с углом разделки

60...70°. Сварка металла большей толщины осуществляется с X-образным видом разделки кромок.

#### ***Автоматическая сварка меди под флюсом угольным электродом***

Листы меди (М1, М2, М3) укладываются плотно без зазора на графитовую подкладку. Сверху кладется полоса присадочного материала, на нее укладывается полоса латуни (Л90), и всё соединение засыпается флюсом (желательно ОСЦ-45). Сварка производится закрытой дугой, угольным электродом. Здесь раскислителем является цинк, который, испаряясь из латуни, создает газовую защиту и раскисляет медь. Диаметр графитового электрода около 20 мм. Для сварки применяется постоянный ток прямой полярности.

#### ***Автоматическая сварка меди под флюсом плавящимся электродом***

Сварка производится под флюсами, не содержащими закиси марганца (АН-20, АН-348А, ОСЦ-45), с присадочной проволокой марок М1, М2. Ток постоянный обратной полярности. Сварку можно вести без общего подогрева металла, но в случае появления пористости нужно применить подогрев до температуры 200 °С.

Основной недостаток сварки меди под плавленными флюсами — слабая раскисленность металла шва, которая приводит к снижению пластических свойств наплавленного металла.

#### ***Автоматическая сварка меди плавящимся электродом под керамическими флюсами***

Основное преимущество этого способа сварки — тщательное раскисление сварочной ванны, обеспечивающее получение сварного соединения высокой прочности и пластичности, без пор и трещин. Кроме того, этот способ позволяет получить металл сварного шва заданного состава путем легирования его через флюс. Применяя модифицирующие элементы, можно получить мелкокристаллическую структуру шва и значительно повысить пластичность сварного соединения. Керамический флюс КМ-1 позволяет получать сварные соединения с высокой прочностью и пластичностью при использовании в качестве присадки проволоки марки М0 или М1.

### *Сварка меди в защитных газах*

Основное преимущество способов сварки в защитных газах – более высокая степень концентрации тепловой энергии дуги, позволяющая вести сварку на большой скорости и снизить уровень коробления изделий.

Сварка в среде аргона (высшего сорта) ведется вольфрамовым электродом на постоянном токе прямой полярности. Металл толщиной свыше 5 мм сваривают с подогревом до 500 °С. В качестве присадочного металла применяют электродную проволоку М1 или М2 или из бронзы (БрХ08, БрКМц3-1). Применение плавящегося электрода рекомендуется для сварки меди толщиной более 5 мм. Применяется постоянный ток обратной полярности, проволока из бронзы БрКМц3-1. Для удаления окислов применяют борный шлак.

Дуговая сварка в среде аргона рекомендуется при толщине меди до трёх миллиметров для соединений, требующих высокой пластичности шва при нормальных и низких (до –183 °С) температурах. Используется присадка М1 и М2 или медно-никелевая проволока с 1...1,2 % Ni. Диаметр присадки 2,5...3 мм, флюсы не требуются, сила тока 160...180 А.

### *Азотно-дуговая сварка*

Азот по отношению к меди является инертным газом и защищает расплавленную медь от вредного воздействия кислорода и паров воды, находящихся в воздухе.

Азотно-дуговая сварка меди производится только неплавящимся электродом с подачей присадки в зону дуги. При сварке применяются угольные или лантанированные вольфрамовые стержни. Чистые вольфрамовые стержни плавятся и загрязняют металл шва вольфрамом.

Устойчивый процесс получается при сварке на постоянном токе прямой полярности от источника питания с высоким напряжением холостого хода. Содержание кислорода в азоте не должно быть более 0,6 %. Сварка меди производится с применением флюса из смеси древесного угля, феррофосфора и алюминиевого порошка. Сварка тонкой меди производится на графитовой или асбестовой подкладке.

### *Электрошлаковая сварка меди*

Для ЭШС меди разработаны специальные легкоплавкие флюсы на фторидной основе, например флюс АМН-10. Установлены оптимальные режимы сварки электродами больших сечений (пластинчатый электрод). Для снижения потерь теплоты и более эффективного использования энергии на плавление основного металла созданы специальные формирующие устройства. Механические и теплофизические свойства швов, выполненных с помощью ЭШС, не уступают основному металлу.

### **3. Сварка бронзы**

Бронза представляет собой сплавы меди с различными компонентами:

БрА5 – алюминиевая бронза: 5 % Al;

БрКМц3-1 – кремне-марганцевая бронза: 1,25 % Mn, 3 % Si;

БрХ05 – хромистая бронза: 0,5 % Cr;

БрОЦ10-2 – оловянно-цинковая бронза: 2 % Zn, 10 % Sn.

Для сварки бронз применяют литые сварочные прутки или электроды того же состава, что и основной металл.

Электродные покрытия и флюс, применяемые для большинства бронз, подобны тем, которые используют при сварке меди. Перед сваркой рекомендуется подогрев металла до температуры 100...300 °С с последующим охлаждением сварного соединения в воде.

Дуговая сварка бронзы угольным электродом производится с присадочными прутками диаметром 6...12 мм и флюсом БМ-1 на основе бора или фтористых и хлористых солей щелочных или щелочноземельных металлов.

Металлическим электродом свариваются все типы бронз на постоянном токе обратной полярности. Тип электрода и покрытий выбирается в соответствии с маркой свариваемой бронзы. При сварке стыковых швов электродами 5...6 мм применяется V-образная разделка с углом 80...90°, притуплением 1,5...2 мм, зазором 2...3 мм.

Алюминиевые бронзы марок БрАМц9-2, БрАЖ9-4 и др. успешно свариваются автоматической сваркой под флюсами АН-20.

Для сварки кремнистых бронз желательно применять аргонодуговую сварку вольфрамовым электродом с присадкой того же

состава, что и основной металл. Механические свойства сварных соединений из бронзы улучшаются термообработкой и горячей проковкой сварных швов.

#### 4. Сварка латуни

Латунь — сплав меди и цинка, но кроме них в состав специальной латуни могут входить и другие элементы в количестве от 1 до 5 %.

Латунь маркируется в зависимости от состава, например: Л-96, т. е. 95...97 % меди, остальное — цинк.

Основной трудностью при сварке латуни является то, что в процессе сварки цинк значительно испаряется и сгорает, в результате чего происходит снижение содержания цинка в металле шва, ухудшается качество шва, появляются поры, понижается пластичность. Кроме того, выделяются вредные для здоровья сварщика пары цинка, поэтому приходится осуществлять сварку в респираторах.

Сварка латуни небольшой толщины (1...10 мм) ведется графитовым электродом с погружением конца электрода в расплавленный металл. В этом случае дуга горит в пузыре, образующемся вокруг электрода из паров цинка. При таком методе сварки снижаются угар и испарение цинка.

В качестве присадки применяют латунные прутки различных марок, например, для Л62 применяют прутки марок ЛК80-3.

При сварке латуни применяют флюсы на основе соединений бора и фтористых и хлористых солей. Сварка ведется на постоянном токе прямой полярности. При сварке металла толщиной от 3 до 16 мм применяется V-образная разделка, угол разделки 70°, притупление кромок 1,5...2 мм. При сварке металла толщиной свыше 16 мм разделка кромок рюмкообразная. Сварку латуни толщиной свыше 10 мм ведут с подогревом до температуры 300...350 °С.

Дуговая сварка покрытыми электродами применяется главным образом при заварке дефектов литья. Применяются электроды марок ОБ и ЗТ. Сварка ведется на постоянном токе обратной полярности, короткой дугой, на асбестовой подкладке. После сварки желательна проковка швов и охлаждение сварного соединения в воде.

Применяется автоматическая сварка латуни металлическим электродом под слоем флюса. Этот метод разработан институтом им. Е.О. Патона.



Для сварки латуни ЛК-80-3 применяется медная проволока М1 и М2 диаметром 2 мм и флюс АН20, постоянный ток обратной полярности. Сварка металла толщиной 6...10 мм ведется с двух сторон без разделки кромок с зазором 3...4 мм на флюсовой подушке.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Характеристика сплавов на основе титана.
2. Основные затруднения при сварке титановых сплавов.
3. Причина склонности к задержанному разрушению сварных конструкций из титановых сплавов.
4. Способы защиты сварных соединений от воздействия окружающей среды при сварке титана.
5. Основные затруднения при сварке меди.
6. Причина «водородной болезни» сварных соединений при сварке меди.
7. Особенности и способы сварки бронзы.
8. Сварка латуни. Причины пористости шва при сварке.
9. Основные затруднения технологического и металлургического характера при электродуговой сварке алюминиевых сплавов.
10. Способы устранения окисной пленки на поверхности основного и присадочного металла при сварке алюминия.
11. Принцип действия «механизма катодного распыления» окисной пленки.
12. Способы электродуговой сварки изделий из алюминиевых сплавов.
13. Оценка способов сварки алюминия и его сплавов.
14. Особенности сварки алюминиевых сплавов трехфазной дугой.
15. Технологические особенности горения трехфазной дуги при наплавке изделий из алюминиевых сплавов.
16. Основные затруднения при сварке магниевых сплавов.
17. Причины образования горячих трещин при сварке магниевых сплавов.
18. Технология заварки дефектов магниевого литья.
19. Как влияют на свариваемость чугуна величина и форма графита, входящего в структуру металла?
20. Какими параметрами определяется качество сварного соединения чугунных изделий?

21. По каким признакам классифицируются способы сварки чугуна?
22. С какой целью применяют общий подогрев чугунных изделий при ремонтной сварке?
23. Какую цель преследуют технологические приемы сварки чугуна электродами из цветных металлов?
24. Почему при сварке чугуна медно-никелевыми электродами уменьшается степень отбела ЗТВ?
25. Какая структура чугуна является наиболее труднообрабатываемой режущим инструментом?
26. Какие способы механизированной сварки чугуна позволяют получать обрабатываемый наплавленный слой?
27. Какой метод разделки кромок считается наиболее производительным при ремонтной сварке чугуна?
28. Основные затруднения при сварке малоуглеродистой и малоуглеродистой низколегированной конструкционной стали.
29. Особенности сварки низколегированных среднеуглеродистых и теплоустойчивых сталей.
30. Способы сварки жаропрочных низколегированных сталей.
31. Особенности сварки среднелегированной стали.
32. Каков гипотетический механизм образования холодных трещин при сварке среднеуглеродистой или среднелегированной стали?
33. Меры предупреждения образования холодных трещин при сварке стали.
34. Особенности сварки среднелегированной стали при различных видах термообработки сварных соединений.
35. Основные затруднения при сварке высоколегированной стали.
36. Причины образования межкристаллитной коррозии при сварке коррозионно-стойкой стали.
37. Мероприятия по предупреждению образования межкристаллитной коррозии сварных соединений из высоколегированной стали.
38. Способы предупреждения образования горячих трещин при сварке высоколегированной аустенитной стали.
39. Технологические варианты сварки ферритной и мартенситной стали.
40. Особенности и основные способы сварки двухслойной стали.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ельцов, В.В. Ремонтная сварка и наплавка деталей машин и механизмов : учебное пособие / В.В. Ельцов. — Тольятти : Изд-во ТГУ, 2012. — 176 с.
2. Ельцов, В.В. Ремонтная сварка и наплавка изделий из легких сплавов : учебное пособие / В.В. Ельцов, В.Ф. Матягин. — Тольятти : ТГУ, 2007. — 213 с.
3. Ельцов, В.В. Оборудование для восстановления и упрочнения деталей машин и аппаратов : учебное пособие / В.В. Ельцов // [CD]: альбом презентаций : наглядное учебное пособие. — Тольятти : ТГУ, 2009. — 702 МБ.
4. Ельцов, В.В. Сварка плавлением металлических конструкционных материалов : учебное пособие / В.В. Ельцов. — Тольятти : ТГУ, 2007. — 196 с.
5. Ельцов, В.В. Ремонтная сварка и наплавка изделий из сплавов магния и алюминия трехфазной дугой : дис. ... д-ра техн. наук / В.В. Ельцов. — Тольятти : ТГУ, 2002. — 322 с.
6. Ельцов, В.В. Наплавка изделий из алюминиевых сплавов трехфазной дугой / В.В. Ельцов, В.Ф. Матягин // Сварочное производство. — 1992. — № 4. — С. 7–8.
7. Ельцов, В.В. Сварка и наплавка изделий из алюминиевых сплавов трехфазной дугой неплавящимися электродами [Электронный ресурс] : лабораторный практикум для работы в виртуальной среде / В.В. Ельцов, М.С. Сабитов. — Тольятти : Изд-во ТГУ, 2014. — 1 электрон. опт. диск (CD).
8. Магниеые сплавы. Справочник. В 2 ч. Ч. 2 / М.Б. Альтман [и др.] ; под ред. М.Б. Альтмана. — М. : Металлургия, 1978. — 295 с.
9. Оборудование и основы технологии сварки металлов плавлением и давлением [Электронный ресурс] : учеб. пособие / под ред. Г.Г. Чернышова, Д.М. Шашина. — СПб. : Лань, 2013. — 464 с.
10. Столбов, В.И. Технология и оборудование для сварки трехфазной дугой неплавящимися электродами : учебное пособие / В.И. Столбов, Г.М. Короткова. — Куйбышев : КуАИ, 1984. — 87 с.
11. Хромченко, Ф.А. Сварочные технологии при ремонтных работах : справочник / Ф.А. Хромченко. — Ростов н/Д : Феникс, 2010. — 397 с.

12. Сварочные электроды — классификация, виды, типы электродов. Сварка в защитных газах. Автоматическая сварка под флюсом [Электронный ресурс]. — URL : <http://www.svarkainfo.ru/rus/technology>, свободный. — Загл. с экрана.
13. Как сварить алюминий. Ручная сварка [Электронный ресурс]. — URL : <http://www.streetriding.nm.ru/8>, свободный. — Загл. с экрана.
14. Дуговая сварка в защитных газах [Электронный ресурс]. — URL : <http://www.autowelding.ru/index/0-36>, свободный. — Загл. с экрана.
15. Сварка в камере с контролируемой атмосферой [Электронный ресурс]. — URL : <http://filebar.kg/main/25-dugovaya-svarka-v-kamerah-s-kontroliruemoy-atmosferoy.html>, свободный. — Загл. с экрана.
16. Сварочное оборудование. Сварочные материалы [Электронный ресурс]. — URL : <http://www.autowelding.ru>, свободный. — Загл. с экрана.
17. Сварка легированной стали. Плюсы и минусы автоматической сварки [Электронный ресурс]. — URL : <http://electrowelder.ru>, свободный. — Загл. с экрана.
18. Применение сварки в защитных газах [Электронный ресурс]. — URL : [http://www.welding.su/articles/gaz/gaz\\_80.html](http://www.welding.su/articles/gaz/gaz_80.html), свободный. — Загл. с экрана.
19. Установки для сварки в контролируемой среде [Электронный ресурс]. — URL : <http://www.tesar.ru/production/cuting/USK-904/>, свободный. — Загл. с экрана.
20. Сварочное оборудование и электроды. Классификация сварки плавлением [Электронный ресурс]. — URL : [http://tehnolog-svarka.ru/klassifikaciya\\_svarki\\_pl](http://tehnolog-svarka.ru/klassifikaciya_svarki_pl), свободный. — Загл. с экрана.
21. Электрошлаковая сварка [Электронный ресурс]. — URL : <http://www.deltasvar.ru/biblioteka/48-vidy-svarki/70-ehlektroshlakovaja-svarka>, свободный. — Загл. с экрана.
22. История развития сварки [Электронный ресурс]. — URL : <http://svarka-don.uaprom.net/a70407-istoriya-razvitiya-svarki.html>, свободный. — Загл. с экрана.

## ГЛОССАРИЙ

**Автоматическая сварка** — дуговая сварка, характеризующаяся механизированным выполнением двух главных рабочих движений — подачи электрода и относительного перемещения дуги и изделия.

**Автоматическое регулирование дуги** — автоматическое поддержание в процессе сварки заданных значений напряжения, тока дуги и скорости сварки.

**Автоматическое слежение** — автоматическое регулирование, при котором установленное значение регулируемой переменной может подвергаться очень быстрым, частым и существенным изменениям.

**Адгезия** (от лат. *adhaesio* — прилипание) — молекулярная связь между поверхностями двух соприкасающихся разнородных твердых или жидких тел.

**Адсорбция** — поглощение (сорбция) веществ из растворов или газов на поверхности твёрдого тела или жидкости.

**Активный флюс** — флюс, способный вступать в химическое взаимодействие с металлом.

**Альфа-железо** ( $\alpha$ -железо) — модификация железа, характеризующаяся объемно-центрированной кубической решеткой;  $\alpha$ -железо устойчиво при обычных температурах.

**Аргон** — химический элемент из группы благородных (инертных) газов, без цвета и запаха; плотность 1,78 кг/м<sup>3</sup>.

**Аргонодуговая сварка** — дуговая сварка, осуществляемая с использованием вольфрамового электрода или проволоки и внешней защиты аргоном, вдуваемым в зону дуги. Может быть ручной, а также автоматической или механизированной.

**Атомно-водородная сварка** — особый вид дуговой сварки, при котором дуга горит между двумя вольфрамовыми электродами в атмосфере водорода. При диссоциации молекул водорода, вводимого в зону дуги через специальную горелку, получается атомарный водород, который служит одновременно средством защиты и дополнительным источником нагрева свариваемого металла, поскольку в процессе восстановления молекул водорода на поверхности металла выделяется тепло.

**Аустенит** [от имени английского металлурга У. Робертса-Остена (W. Roberts-Austen; 1843–1902)] — фаза железоуглеродистых сплавов, твёрдый раствор углерода (до 2 %) и легирующих элементов

в гамма-железе. Имеет кристаллическую гранецентрированную кубическую решётку.

**Ацетилен** ( $C_2H_2$ ) – бесцветный газ. Применяется в сварочной технике в качестве универсального горючего. В промышленности его получают при взаимодействии карбида кальция и воды, а также из природного газа.

**Балластный реостат** (для дуговой сварки) – реостат, включаемый в сварочную цепь последовательно с дугой. Его устройство позволяет изменять величину сопротивления и таким образом регулировать режим сварки.

**Блуждание дуги** – беспорядочное перемещение сварочной дуги по изделию. Оно обусловлено влиянием загрязнения поверхности металла, потоков воздуха и магнитных полей и вредно сказывается на процессе формирования шва. Это явление особенно часто наблюдается при сварке угольным электродом.

**Бура** (селитра)  $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$  – соль тетраборной кислоты, бесцветные кристаллы; плотность 1690...1720 кг/м<sup>3</sup>. Применяется в качестве компонента флюсов для сварки и пайки.

**Быстродвижущийся источник теплоты** – подвижный источник теплоты, скорость перемещения которого настолько велика, что позволяет в упрощенных инженерных расчетах изотерм плавления пренебрегать распространением теплоты впереди самого источника.

**Ванная сварка** – электродуговая сварка, характеризующаяся увеличенными размерами сварочной ванны, удерживаемой в специальной форме.

**Вертикальное положение** – положение сварки, при котором угол наклона стыкового или углового шва к горизонту равен 90°.

**Вращающееся магнитное поле** – переменное магнитное поле, постоянное по величине, но периодически изменяющее направление так, что вектор напряженности вращается с постоянной угловой скоростью.

**Выводная планка** – вспомогательная металлическая планка, прихватываемая к собранным под сварку деталям для расположения на ней начала шва или вывода конечного кратера.

**Вылет электрода** (при электродуговой сварке) – расстояние от точки токоподвода до конца электрода, на котором горит дуга.

**Высокий отпуск** — отпуск, заключающийся в нагреве стали до температуры в интервале 500...680 °С и медленном охлаждении с целью получения структуры сорбита отпуска.

**Высокомарганцевый флюс** — плавеный флюс, содержащий более 30 % MnO (закиси марганца).

**Вязкость материала** — способность материала поглощать при пластическом деформировании механическую энергию в заметных количествах, не разрушаясь.

**Газовая сварка** — сварка плавлением, при которой металл нагревается пламенем газа, сжигаемого для этой цели в смеси с кислородом в специальных горелках. В качестве горючего газа чаще всего применяется ацетилен.

**Газообразующие компоненты покрытий** — компоненты электродных покрытий, разлагающиеся при нагревании с образованием газов, которые защищают зону сварки от вредного влияния воздуха. В этом качестве используются органические (крахмал, целлюлоза) и неорганические вещества (карбонаты и др.).

**Горизонтальное положение** — положение сварки, характеризующееся углом наклона стыкового или углового шва, равным 0°, и их углом поворота относительно нижнего положения, равным 90°.

**Горячая сварка чугуна** — сварка (дуговая, газовая, термитная и др.) чугуна с предварительным подогревом изделия до температуры перехода металла в пластическое состояние с полной потерей упругости (500...700 °С). Такие способы позволяют уменьшать сварочные напряжения и получать лучшую структуру металла шва по сравнению с холодной сваркой чугуна.

**Длина дуги** — расстояние между электродными пятнами сварочной дуги, измеренное по оси столба дуги.

**Длинный флюс** — флюс, имеющий большой температурный интервал затвердевания.

**Жаропрочность** — способность материалов при высоких температурах выдерживать без разрушения механические нагрузки.

**Жаростойкость** — применительно к металлам и сплавам то же, что и жароупорность, окалиностойкость.

**Жидкое стекло** — водный раствор силиката натрия  $\text{Na}_2\text{O} \cdot (\text{SiO}_2)_m$  или силиката калия  $\text{K}_2\text{O} \cdot (\text{SiO}_2)_n$ , обладающий клеящими свойствами.

ми и применяемый в электродных покрытиях в качестве связующего и стабилизирующего дуговой разряд компонента.

**Жидкая углекислота** — углекислый газ в сжиженном виде, применяется для защиты расплавленного металла.

**Закалочные трещины** — холодные трещины, образующиеся в сварных соединениях в результате закалочных явлений.

**Зона термического влияния** — примыкающий к зоне сплавления участок основного металла со структурой и свойствами, изменившимися в результате сварочного нагрева по сравнению со структурой и свойствами исходного металла.

**Ионизирующие компоненты покрытий** — компоненты электродных покрытий, содержащие элементы с низким потенциалом ионизации, которые способствуют повышению устойчивости горения дуги (щелочные и щелочноземельные металлы).

**Керамический флюс** — неплавленный флюс, получаемый смешиванием порошкообразных шлакообразующих, легирующих, раскисляющих и других компонентов. Связующим раствором служит жидкое стекло. Смесь подвергается грануляции, сушке, прокатке.

**Кондуктор** (сборочно-сварочный) — приспособление, снабженное постоянными упорами, гнездами и крепежными устройствами для фиксации правильного взаимного расположения собираемых и свариваемых деталей изделия.

**Конструкционные материалы** — материалы, применяемые для изготовления конструкций, воспринимающих силовую нагрузку. Их подразделяют на металлические, неметаллические и композиционные материалы.

**Концентратор напряжений** — фактор, обуславливающий местное возрастание напряжений по сравнению с их значением, подсчитанным по формулам сопротивления материалов. В сварных швах концентраторами напряжений являются трещины, непровары, подрезы, шлаковые включения и другие дефекты.

**Короткий флюс** — флюс, имеющий малый температурный интервал затвердевания.

**Кратер сварочный** — 1. Углубление на поверхности сварочной ванны у основания горячей дуги. 2. Углубление на поверхности шва в месте обрыва дуги.



**Кристаллизационные трещины** – горячие трещины, образующиеся в сварных соединениях при завершении процесса кристаллизации.

**Магнитное дутье** – воздействие на дугу собственного поля сварочного тока и ферромагнитных масс или постороннего магнитного поля, затрудняющее выполнение сварки. Степень воздействия определяется местом подвода тока к изделию, толщиной свариваемого металла, конфигурацией изделия и пр.

**Межкристаллитная коррозия** – коррозия, развивающаяся по границам зёрен металла (сплава), которая приводит к нарушению связи между зёрнами и разрушению металла на большую глубину без явных наружных следов коррозии.

**Мелкокапельный перенос металла** – перенос металла, осуществляемый в виде мелких капель без замыкания дугового промежутка.

**Модификация металла шва** – введение в сварочную ванну малых добавок веществ, которые способствуют измельчению структуры металла шва, практически без изменения его химического состава.

**Непровар** – дефект сварных швов, заключающийся в отсутствии сплавления между металлом шва и основным металлом, основным металлом и основным металлом или же – при многослойной сварке – между слоями металла шва.

**Ножевая коррозия** – коррозия, локализованная в зоне сплавления сварного соединения. Обычно она появляется в результате развития межкристаллитной коррозии под действием очень агрессивных сред в нержавеющей хромоникелевых сталях.

**Обратная полярность** (при дуговой сварке) – полярность, при которой положительный полюс источника питания соединяется с электродом, а отрицательный полюс – с изделием.

**Обратноступенчатая сварка** – способ ручной сварки металлическим электродом, при котором выполнение шва по длине осуществляется участками (ступенями), располагаемыми последовательно один за другим, причем направление сварки отдельных участков противоположно направлению шва. Уменьшает сварочные деформации и напряжения в сварном соединении.

**Обратные деформации** (сварных конструкций) – предварительные деформации, направленные в сторону, противоположную ожидаемой остаточной деформации, например предварительное растяжение, предварительный (обратный) выгиб и т. п.

**Плавающий мундштук** — используемая при электрошлаковой сварке металлическая пластина с отверстиями, трубка и т. п., имеющая назначение направлять проволоку в зазор шва, но расплавляемая в процессе сварки подобно плавящемуся электроду.

**Плотность тока** — величина, численно равная отношению силы тока к площади поперечного сечения проводника.

**Прямая полярность** (при дуговой сварке) — полярность, при которой отрицательный полюс источника питания соединяется с электродом, а положительный — с изделием.

**Равнопрочное соединение** — сварное соединение, не уступающее по прочности основному металлу.

**Раскисление металла** — одна из основных операций очистки стали и сплавов от окислов металлов, заключающаяся в удалении кислорода из жидкого металла путём подачи в расплавленный металл раскислителей — веществ, обладающих лучшей способностью соединяться с кислородом, чем основной компонент сплава.

**Сварка горкой** — многослойная ручная сварка металлическим электродом, характеризуемая последовательным наложением от середины длины соединяемых кромок к их краям одновременно в двух направлениях частично перекрывающих друг друга слоев относительно небольшой протяженности с таким расчетом, чтобы каждый последующий слой накладывался на еще не успевший остыть предыдущий валик.

**Сварка каскадом** — многослойная ручная сварка металлическим электродом, характеризуемая последовательным наложением частично перекрывающих друг друга слоев небольшой протяженности, причем так, чтобы каждый последующий слой накладывался на еще не успевший остыть предыдущий, а направление сварки отдельных слоев было противоположно направлению шва в целом.

**Сварка на подъем** — автоматическая дуговая сварка в нижних положениях, при которой продольная ось шва образует с горизонтальной плоскостью угол порядка нескольких градусов и сварочная ванна перемещается снизу вверх. В этом случае вытекание из-под дуги жидкого металла сварочной ванны оказывает влияние на форму проплавления, увеличивая его глубину и уменьшая ширину.

**Сварка на спуск** — автоматическая дуговая сварка в нижних положениях, при которой продольная ось шва образует с горизонтальной плоскостью угол порядка нескольких градусов и сварочная

ванна перемещается сверху вниз. В этом случае подтекание под дугу жидкого металла сварочной ванны оказывает влияние на форму проплавления, уменьшая его глубину и увеличивая ширину.

**Сварка пучком электродов** — ручная сварка металлическим электродом, осуществляемая с использованием одновременно нескольких штучных электродов с качественным покрытием. Электроды скрепляются между собой в нескольких местах проволокой, в то время как их контактные концы свариваются вместе и вставляются в общий электрододержатель. Ток подводится одновременно ко всем электродам, а дуга горит попеременно между отдельными электродами пучка и изделием.

**Торированный электрод** — неплавящийся электрод из вольфрама, в состав которого вводится двуокись тория  $\text{ThO}_2$  для повышения устойчивости дуги и уменьшения расхода электродного материала.

**Точка Кюри** — температура, при которой ферромагнитные материалы полностью теряют свои магнитные свойства.

**Холодные трещины** — трещины, образующиеся в сварных соединениях преимущественно при нормальной температуре, а также при температурах ниже  $200^\circ\text{C}$ .

**Цементит**,  $\text{Fe}_3\text{C}$  — структурная составляющая стали, карбид железа.

**Ядро пламени** — внутренняя часть газосварочного пламени из углеводородного горючего в смеси с кислородом, ограниченная раскаленной светящейся оболочкой.

*Международные термины и определения  
в области сварки*

**A-MIG** – activated inert-gas metal-arc welding – сварка плавящимся (металлическим) электродом в инертном газе по слою активирующего флюса.

**A-TIG** – activated inert-gas tungsten-arc welding – сварка вольфрамовым электродом в инертном газе по слою активирующего флюса.

**AAC [CAC-A]** – air carbon arc cutting – воздушно-дуговая резка угольным электродом.

**AHW** – atomic hydrogen welding – атомно-водородная сварка.

**AOC** – arc-oxygen cutting – кислородно-дуговая резка.

**Arc welding** – Lichtbogenschmelzschweissen. Schmelzschweissen mit Lichtbogen, Lichtbogenschweissen – дуговая сварка плавлением; дуговая электросварка; электродуговая сварка.

**CAC-A [AAC]** – air carbon arc cutting – воздушно-дуговая резка угольным электродом.

**CAW** – carbon arc welding – дуговая сварка угольным электродом.

**Cold crack** / Kaltriss – закалочная трещина; холодная трещина.

**DCRP** – direct current of reversed polarity – постоянный ток обратной полярности.

**EBW-HV** – high-vacuum electron beam welding – электронно-лучевая сварка в высоком вакууме.

**ESW** – electroslag welding – электрошлаковая сварка.

**FCAW-G** – gas-shielded flux-cored arc welding – дуговая сварка порошковой проволокой в защитном газе.

**FSW** – friction stir welding – сварка трением с перемешиванием.

**GCAW** – gas carbon arc welding – дуговая сварка угольным электродом в защитном газе.

**GMAW** – gas mixture metal arc welding – дуговая сварка металлическим (плавящимся) электродом в смеси защитных газов.

**GTAW-P** – pulsed gas tungsten arc welding – импульсно-дуговая сварка вольфрамовым электродом в защитном газе.

**HAZ** – [heat-affected zone] / WEZ Wärmeeinflusszone – зона термического влияния; ЗТВ.

**Hydrogen welding** – Wasserstoff-schweißen – водородная сварка; водородно-кислородная сварка.

**LBW** – laser beam welding – лазерная сварка.

**MAC** – metal-arc cutting – дуговая резка металлическим электродом.

**MAG welding** / MAG-Schweißen – (дуговая) сварка плавящимся электродом в среде активного газа.

**MAGW** – metal arc active gas welding – дуговая сварка металлическим (плавящимся) электродом в активном газе.

**MIG/MAG torch** / MIG/MAG-Schweißbrenner – горелка для полуавтоматической электросварки; горелка MIG/MAG; горелка для сварки плавящимся металлическим электродом в среде инертного/активного газа.

**MMAW** – manual metal arc welding – ручная дуговая сварка металлическим электродом.

**MMA welding** / Lichtbogenhand-schweißen – ручная электродуговая сварка.

**OFC-N** – oxyfuel cutting – natural gas – газопламенная (кислородная) резка с использованием природного газа.

**PAC** – plasma arc cutting – плазменная резка (резка сжатой дугой).

**PTAW** – plasma transferred-arc welding – плазменная сварка дугой прямого действия.

**SAW** – submerged-arc welding – дуговая сварка под флюсом.

**TIG** – tungsten inert gas (welding) – дуговая сварка вольфрамовым электродом в инертном газе.