

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

А.Л. Федоров

# ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

А - Электронное учебное пособие



© ФГБОУ ВО «Тольяттинский  
государственный университет», 2019

ISBN 978-5-8259-1422-0

УДК 621.791.037.2(075.8)

ББК 34.641.51-56я73

Рецензенты:

канд. техн. наук, зам. руководителя АЦСП ООО «Средневожский сертификационно-диагностический центр «Дельта» *О.В. Шашкин*;  
канд. техн. наук, доцент кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы» Тольяттинского государственного университета *А.Ю. Краснопевцев*.

Федоров, А.Л. Электроды для сварки плавлением : электронное учебное пособие / А.Л. Федоров. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2019. – 1 оптический диск.

В учебном пособии изложена классификация электродов для сварки плавлением, основы их производства; рассмотрены особенности электродов для сварки различных конструкционных металлов, как черных, так и цветных.

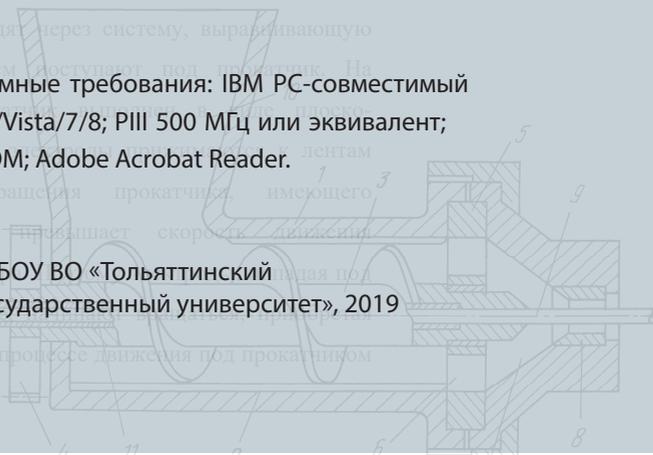
Предназначено для помощи студентам, обучающимся по направлению подготовки 15.03.01 «Машиностроение» очной и заочной форм обучения.

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.

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», 2019





Редактор *Т.М. Воропанова*

Технический редактор *Н.П. Крюкова*

Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*

Художественное оформление, компьютерное

проектирование: *Г.В. Карасева, И.В. Карасев*

Рис. 2.6. Схема изготовления электродов

Дата подписания к использованию 22.01.2019.

Объем издания 6,3 Мб.

Комплектация издания: компакт-диск, первичная упаковка.

Заказ № 1-11-18.

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
1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОДОВ .....	6
2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОКРЫТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ .....	15
2.1. Изготовление стержней .....	15
2.2. Подготовка покрытия .....	19
2.3. Компоненты для покрытий .....	22
2.4. Нанесение покрытий .....	28
3. ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ СВАРКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ .....	39
4. ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ СВАРКИ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ .....	47
5. ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ СВАРКИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И ЧУГУНА .....	60
5.1. Электроды для сварки меди и ее сплавов .....	60
5.2. Электроды для сварки алюминия и его сплавов .....	62
5.3. Электроды для сварки никеля и его сплавов .....	65
5.4. Электроды для сварки чугуна .....	69
6. НЕПЛАВЯЩИЕСЯ ЭЛЕКТРОДЫ .....	74
7. ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ НАПЛАВКИ .....	89
Библиографический список .....	92

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в промышленности применяют различные методы сварки, среди которых основное место занимает дуговая сварка плавлением.

Качество соединений, получаемых дуговой сваркой, зависит от многих факторов, в том числе определяется рациональным выбором электродов для сварки. Сварочный электрод – это металлический или неметаллический стержень из электропроводного материала, предназначенный для подвода тока к свариваемому изделию. Впервые в 1802 году профессор В.В. Петров использовал электрод в экспериментах по исследованию свойств электрической дуги. В 1882 году Н.Н. Бенардос предложил использовать электрическую дугу, горящую между угольным электродом и металлической деталью, для соединения металлических кромок. Одновременно с Н.Н. Бенардосом Н.Г. Славянов заменил неплавящийся угольный электрод металлическим плавящимся электродом-стержнем, чей химический состав был близок к свариваемому металлу. В 1904 году швед О. Кьельберг изобрел технологию сварки покрытыми плавящимися электродами. Покрытие стабилизировало горение электрической дуги и защищало зону дуговой сварки.

Электроды делятся на плавящиеся и неплавящиеся. Плавящиеся электроды изготавливают из сварочной проволоки, и они, помимо подвода тока к свариваемому изделию, участвуют в формировании сварного шва.

Отечественные производители выпускают свыше 200 различных марок электродов. Завод по производству электродов есть в Тольятти. Также аналогичные заводы есть поблизости – в Волгограде, Омске, Свердловской, Челябинской областях. Из зарубежных производителей электродов можно выделить американскую фирму Lincoln Electric, шведскую ESAB, японскую Kobe Steel.

Данная работа поможет разработчику технологии сварки того или иного изделия правильно ориентироваться во всем многообразии выпускаемых электродов.

## 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОДОВ

Электроды, применяемые для выполнения сварных швов ручной дуговой сваркой, разделяются на плавящиеся и неплавящиеся.

Стержни плавящихся при сварке электродов могут быть изготовлены из чугуна, стали, меди или другого металла, в зависимости от химического состава свариваемого материала. Они играют роль анода или катода, а также выполняют функцию присадочного материала. Бывают покрытые или непокрытые плавящиеся электроды. Покрытие на плавящихся стержнях выполняет много функций, начиная от поддержания горения дуги до формирования газового облака, препятствующего взаимодействию расплава сварочной ванны с атмосферным воздухом.

Неплавящиеся электроды для сварки изготавливают из различных тугоплавких материалов: графит, вольфрам или уголь. Служат они для розжига и удержания дуги, а заполнение шва присадочным материалом обеспечивается с помощью подачи в зону сварки плавящегося материала.

В России руководствуются следующими стандартами на плавящиеся электроды для сварки и наплавки:

1. ГОСТ 9466-75 «Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки сталей и наплавки. Классификация и общие технические условия».

2. ГОСТ 9467-75 «Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей. Типы».

3. ГОСТ 10051-75 «Электроды покрытые металлические для ручной дуговой наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами. Типы».

4. ГОСТ 10052-75 «Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами. Типы».

Согласно требованиям ГОСТ 9466-75 электроды для сварки и наплавки классифицируют по назначению, типам, маркам, толщине электродного покрытия, видам покрытия, качеству изготовления, допустимым пространственным положениям сварки, характеристикам сварочного тока.

По назначению электроды подразделяют

- для сварки:
  - углеродистых низколегированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву до 60 кгс/мм<sup>2</sup> (590 МПа); обозначение У;
  - легированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву свыше 60 кгс/мм<sup>2</sup> (590 МПа). Если после цифр стоит буква А, то металл шва, выполненного данным электродом, имеет повышенные пластические свойства шва; обозначение Л;
  - легированных теплоустойчивых сталей; обозначение Т;
  - высоколегированных сталей с особыми свойствами; обозначение В;
    - для наплавки поверхности слоев с особыми свойствами; обозначение Н.

На типы электроды классифицируют согласно ГОСТ 9467-75, ГОСТ 10051-75 и ГОСТ 10052-75. Обозначение типа электрода состоит из индекса Э (электроды для ручной дуговой сварки и наплавки) и следующих за ним цифр и букв.

Согласно ГОСТ 9467-75 изготавливаются электроды следующих типов:

- Э38, Э42, Э46 и Э50 – для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву до 50 кгс/мм<sup>2</sup> (480 МПа);
- Э42А, Э46А и Э50А – для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву до 50 кгс/мм<sup>2</sup> (480 МПа), когда к металлу сварных швов предъявляют повышенные требования по пластичности и ударной вязкости;
- Э55 и Э60 – для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву свыше 50 и до 60 кгс/мм<sup>2</sup>;
- Э70, Э85, Э100, Э125, Э150 – для сварки легированных конструкционных сталей повышенной и высокой прочности с временным сопротивлением разрыву свыше 60 кгс/мм<sup>2</sup>;
- Э-09М, Э-09МХ, Э-09Х1М, Э-05Х2М, Э-09Х2М1, Э-09Х1МФ, Э-10Х1М1НФБ, Э-10Х3М1БФ, Э-10Х5МФ – для сварки легированных теплоустойчивых сталей.

У электродов для сварки конструкционных сталей две или три цифры в обозначении указывают временное сопротивление разрыву металла шва в кгс/мм<sup>2</sup>. Для прочих электродов две или три цифры, следующие за индексом, указывают среднее содержание углерода в наплавленном металле в сотых долях процента. Химические элементы, содержащиеся в наплавленном металле, обозначены аналогично маркировке сталей и сварочных проволок следующими буквами: А – азот; Б – ниобий; В – вольфрам; Г – марганец; Д – медь; К – кобальт; М – молибден; Н – никель; Р – бор; С – кремний; Т – титан; Ф – ванадий; Х – хром.

Цифры, следующие за буквенными обозначениями химических элементов, указывают среднее содержание элементов в процентах. После буквенного обозначения химических элементов, среднее содержание которых в наплавленном металле не более 1,5 %, цифры не ставятся. При среднем содержании в наплавленном металле кремния 0,8 % и марганца до 1 % буквы С и Г не ставятся.

ГОСТ 10051-75 и ГОСТ 10052-75 предусматривают соответственно 44 и 49 типов электродов.

Подразделение электродов на марки осуществляют в соответствии с паспортами и техническими условиями организаций-разработчиков и изготовителей. Каждому типу электродов может соответствовать одна или несколько марок. Согласно принятой практике обозначение марки электродов состоит из буквенной и цифровой частей. В буквенной части в закодированном виде представлено, как правило, наименование организации-разработчика: например, электроды ОЗС, ОЗЛ, ОЗР – Московский опытный сварочный завод (общего назначения, высоколегированные, для резки соответственно); электроды АНО, АНВ – институт электросварки им. Е.О. Патона АН УССР (общего назначения, высоколегированные); электроды ЦТ, ЦН, ЦЛ – ЦНИИТмаш и т. п.

Цифровая часть представляет собой порядковый номер электрода в соответствующей группе и не несёт другой смысловой нагрузки, за исключением электродов серии УОНИ-13 и УП, где обозначает среднее значение временного сопротивления разрыву металла шва в кгс/мм<sup>2</sup>. Следует отметить, что на покрытие УОНИ-13 еще в 1940 г. было получено авторское свидетельство № 65424. Указанная аббре-

виатура расшифровывается как универсальная обмазка НИИ-13. Электроды УП-1/45 разработаны тоже НИИ-13. Расшифровывается аббревиатура так: «универсальное покрытие номер 1».

Разработка каждого покрытия — это продолжительные научные исследования. Следует учитывать, что к функциям покрытия относятся: поддержание стабильности горения дуги; защита зоны сварки от вредных атмосферных газов; раскисление металла шва; легирование металла шва; обеспечение высокой производительности сварки; обеспечение возможности сварки в разных пространственных положениях.

Кроме того, к самому покрытию предъявляют ряд требований: оно не должно быть гигроскопичным; не должны теряться технологические свойства после длительного хранения; покрытие не должно откалываться после падения электрода. Например, сварку уже упомянутыми электродами УОНИ-13 можно было вести только на постоянном токе. Однако уже в 1942 году, ввиду резкого увеличения объема сварочных работ, в СССР стал ощущаться недостаток машин постоянного тока [7]. Возникла острая необходимость в разработке новых электродов для сварки на переменном токе, сохраняющих все достоинства электродов УОНИ-13, аналогов которым тогда не было ни в СССР, ни за рубежом.

Разработку таких электродов поручили НИИ-13. Было исследовано 79 вариантов состава покрытия, и только в 1950 году новые электроды (уже упомянутые здесь УП-1) были переданы для испытания ряду заводов и строительных организаций.

По толщине покрытия, в зависимости от отношения диаметра электрода с покрытием к номинальному диаметру электрода (определяемый диаметр стержня —  $D/d$ ), рис. 1, они классифицируются как электроды:

- с тонким покрытием ( $D/d \leq 1,2$ ); обозначается М,
- со средним покрытием ( $1,2 < D/d \leq 1,45$ ); С,
- с толстым покрытием ( $1,45 < D/d \leq 1,8$ ); Д,
- с особо толстым покрытием ( $D/d > 1,8$ ); Г.

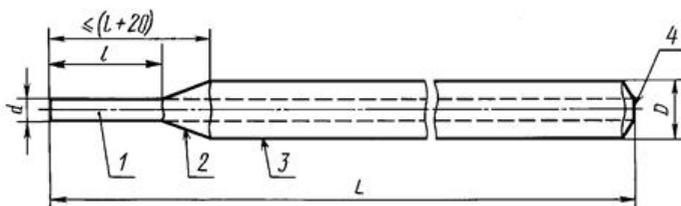


Рис. 1. Основные размеры электродов: 1 – стержень; 2 – участок перехода; 3 – покрытие; контактный торец без покрытия

По видам покрытия подразделяются на электроды:

- с кислым покрытием; обозначается А,
- с основным покрытием; Б,
- с целлюлозным покрытием; Ц,
- с рутиловым покрытием; Р,
- с покрытием смешанного вида – соответствующее двойное условное обозначение,
- с прочими видами покрытий; П.

Наличие в обозначении вида покрытия буквы Ж свидетельствует о присутствии в составе покрытия железного порошка в количестве более 20 %. Иногда в технической литературе вместо термина «вид покрытия» используют термин «тип покрытия», что не следует смешивать с типом электрода.

Электроды с кислым видом покрытия допускают сварку во всех пространственных положениях постоянным или переменным током. Эти электроды не рекомендуются для сварки сталей с повышенным содержанием серы и углерода. Недостаток таких электродов – возможно сильное разбрызгивание и образование трещин в швах. Основу состава кислого покрытия составляют оксиды кремния, алюминия, марганец, оксиды железа. Крахмал и декстрин, присутствующие в покрытии, обеспечивают газовую защиту.

Электроды с основным покрытием применяют для сварки металла большой толщины постоянным током обратной полярности (+ на электроде) во всех пространственных положениях. Рекомендуется проводить сварку короткой дугой во избежание пористости. В состав основного покрытия входят фтористые соединения, карбонаты кальция и магния. Газовую защиту зоны сварки обеспечивает

выделяющийся при разложении карбонатов углекислый газ. Фтор обеспечивает стабильность горения дуги. Кальций очищает металл шва от серы и фосфора. Электроды с основным покрытием обладают повышенной чувствительностью к влажной среде, поэтому их необходимо прокалывать и сушить перед применением, даже если они были в контакте с атмосферным воздухом незначительное время.

Обмазка электродов с целлюлозным покрытием содержит до пятидесяти процентов органических компонентов, в основном целлюлозы, а также марганец, рутил и другие неорганические составляющие. Благодаря высокому уровню концентрации защитного газа при сварке образуется незначительное количество шлака. Электроды с целлюлозным покрытием используются для сварки металлоконструкций во всех пространственных положениях постоянным и переменным током. Основной недостаток электродов с целлюлозным покрытием в том, что значительны потери на разбрызгивание.

Основу покрытия рутиловых электродов составляет двуокись титана (минерал рутил), а также магнезит, мрамор, каолин, полевой шпат и ряд других органических и минеральных компонентов. Благодаря разрушению органической составляющей и карбонатов обеспечивается высокий уровень защиты сварочной ванны.

Электроды с рутиловым покрытием выделяют при плавлении газовые соединения малой токсичности и образуют легко отслаивающийся шлаковый слой. Кроме того, они создают стабильную дугу и зажигаются легче, чем другие электроды. Еще одно достоинство рутила – минимальное разбрызгивание металла сварной ванны. Электроды с рутиловым покрытием обеспечивают возможность сварки в различных пространственных положениях постоянным и переменным током.

Важной особенностью электродов с рутиловым покрытием является легкость повторного зажигания дуги, обусловленная наличием  $TiO_2$ . При этом не требуется даже удалять пленку в кратере электрода, поскольку она (при достаточно высоком содержании  $TiO_2$ ) обладает проводимостью полупроводника и обеспечивает зажигание дуги без соприкосновения стержня с основным металлом. Это достоинство рутиловых покрытий создает большое удобство при ра-

боте короткими швами, когда требуется часто прерывать дугу. Рутитовые покрытия менее вредны для здоровья сварщика, чем другие.

Покрытия смешанного типа делают на основе рутитового: рутитово-целлюлозный тип; рутитово-основной; рутитово-кислый. Это позволяет соответствующим образом улучшить свойства рутитовых электродов и повысить качество шва в зависимости от сферы применения.

Обозначение электродов по допустимым пространственным положениям сварки следующее: 1 – для всех положений; 2 – для всех положений, кроме вертикального «сверху вниз»; 3 – для нижнего, горизонтального на вертикальной плоскости и вертикального «снизу вверх»; 4 – для нижнего и нижнего в лодочку.

По роду и полярности применяемого при сварке тока, а также по номинальному напряжению холостого хода используемого источника питания сварочной дуги переменного тока частотой 50 Гц электроды подразделяются на 10 групп (табл. 1).

Таблица 1

Обозначение видов электродов в зависимости от рода и полярности сварочного тока

Рекомендуемая полярность постоянного тока	Напряжение холостого хода источника тока, В		Обозначение электродов
	Номинальное	Отклонение, не более	
Обратная	–	–	0
Любая	50	±5	1
Прямая			2
Обратная			3
Любая	70	±10	4
Прямая			5
Обратная			6
Любая	90	±5	7
Прямая			8
Обратная			9

В ГОСТ 9466-75 установлена структура условного обозначения электродов, указываемого на сопроводительных этикетках или в маркировке коробок, пачек и ящиков с электродами.

Электроды для сварки углеродистых, низколегированных и легированных конструкционных и легированных теплоустойчивых сталей поставляются по ГОСТ 9467-75. В зависимости от требований к показателям прочности и пластичности металла шва стандартизировано 14 типов электродов для конструкционных сталей. При этом химический состав наплавленного металла стандартом не нормируется, за исключением предельного содержания ведущих примесей – серы и фосфора.

Стандартизировано также 9 типов электродов для сварки легированных теплоустойчивых сталей, для которых нормированы механические свойства металла шва и химический состав наплавленного металла.

Электроды для сварки коррозионно-стойких, жаропрочных и жаростойких высоколегированных сталей мартенситного, мартенсито-ферритного, аустенито-ферритного и аустенитного классов поставляются по ГОСТ 10052-75, который предусматривает 49 основных типов электродов.

Для этих электродов нормируются химический состав наплавленного металла и механические свойства металла шва, а для некоторых типов – содержание ферритной фазы в наплавленном металле.

Электроды для наплавки выпускают по ГОСТ 10051-75, которым нормировано 44 типа электродов различного химического состава и твёрдости наплавленного металла.

### **Контрольные вопросы**

1. Для чего предназначено покрытие электрода?
2. Какой буквой обозначается основное покрытие электродов?
3. Какой буквой обозначаются электроды с тонким покрытием?
4. К какому полюсу источника питания подключается электрод при сварке на обратной полярности?
5. Какая цифра должна стоять в обозначении электродов, если электрод предназначен для сварки во всех пространственных положениях?

6. Могут ли у одного типа электрода быть разные марки?
7. Что определяет марку электрода?
8. Какие преимущества при сварке на переменном токе?
9. На основе какого покрытия делают смешанные?
10. Какое покрытие наименее вредно для здоровья сварщика?
11. Какой основной недостаток электродов с целлюлозным покрытием?
12. На что указывают две или три цифры в обозначении электродов для сварки конструкционных сталей?

## 2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОКРЫТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

### 2.1. Изготовление стержней

Основу плавящихся электродов составляют металлические стержни, изготавливаемые главным образом из стальной сварочной проволоки, специально для этого предназначенной (рис. 2). Такую проволоку выпускают по ГОСТ 2246-70 «Проволока стальная сварочная. Технические условия» или по техническим условиям, устанавливающим отличный от стандартного химический состав металла проволоки и предусматривающим остальные требования по указанному стандарту.



Рис. 2. Проволока для изготовления стержней электродов

Обычно для изготовления сварочных электродов применяется проволока, прошедшая холодное волочение, реже горячекатаная. Волочению подвергается проволока, полученная после прокатки стали на проволочном стане. При остывании прокатанной проволоки на воздухе на её поверхности образуется слой окалины. Окалина удаляется травлением в растворе серной кислоты перед холодным волочением. Процесс холодного волочения заключается в протяги-

вании проволоки через отверстие фильера, диаметр которого меньше диаметра проволоки. При этом проволока уплотняется, за счет наклепа делается упругой; поверхность ее приобретает гладкий и блестящий вид. Холоднотянутая проволока поставляется в мотках, значительно реже — в виде стержней или прутков. Горячекатаная проволока поставляется только в мотках.

Поверхность проволоки должна быть чистой и гладкой, без трещин, расслоений, раковин, окалины, ржавчины, масла и других поверхностных дефектов и загрязнений. Допустимы риски, царапины, местная рябизна и отдельные вмятины, причем глубина указанных дефектов не должна превышать предельного отклонения по диаметру проволоки.

Проволоку, поставляемую с металлургических заводов, правят, разрезают по длине на прутки. Если проволока предназначена для изготовления электродов высокого качества для ответственной сварки, то она дополнительно подвергается очистке от следов масла и ржавчины.

Проволоку, предназначенную для изготовления электродов для сварки высоколегированных сталей, при запуске в производство необходимо подвергать проверке на стилоскопе на содержание основных элементов, определяющих принадлежность проволоки к марке, запущенной в производство.

В зависимости от требований, предъявляемых к качеству правки, а также от профиля поперечного сечения исходного материала существуют два основных принципиально разных технологических процесса правки материала в мотках: роликовая правка в двух взаимно перпендикулярных плоскостях посредством многократного поперечного пластического изгиба (роликовые правильные машины); всесторонняя правка путем многократного пластического поперечного изгиба в сухарях (фильерах) вращающейся правильной рамки.

В машинах для правки проволоки с помощью роликов одну часть роликов устанавливают в горизонтальной плоскости, другую часть — в вертикальной. Правка осуществляется между двумя рядами роликов, причем ролики одного ряда размещены по отношению к роликам другого ряда в шахматном порядке. Материал при прохождении между роликами подвергается многократным, чере-

дующимся в противоположные стороны поперечным изгибам (перегибам) с напряжениями, превосходящими предел текучести материала, в результате чего и достигается его правка.

Всесторонняя правка проволоки реализуется с помощью быстро вращающейся правильной рамки или правильного барабана со специальными сухарями (рис. 3). Проволока 1, протаскиваемая при вращении барабана 2 сквозь смещенные относительно оси барабана сухари 3, выправляется посредством многократных, чередующихся в противоположные стороны пластических поперечных изгибов. Основным преимуществом процесса правки с помощью роликов является значительно более высокое качество выправляемого материала.

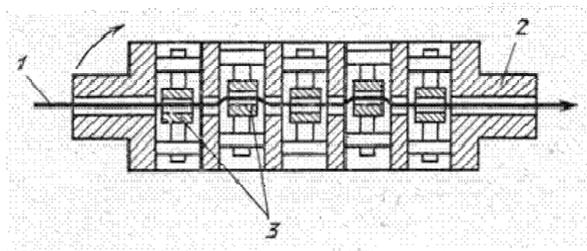


Рис. 3. Правильный барабан:  
1 – проволока; 2 – барабан; 3 – сухари

Все правильно-отрезные автоматы при одинаковом принципе правки проволоки отличаются главным образом конструкцией рубящего механизма и кинематической схемой взаимодействия узлов подачи и рубки проволоки. В станках, работающих «до упора», проволока отрезается при остановке ее подачи вследствие проскальзывания (пробуксовки), разжима или остановки тянущих роликов. Рубящий узел, оснащенный гильотинным ножом, может работать и независимо от узла подачи проволоки. При такой схеме рубки обеспечивается высокое качество отреза и минимальное отклонение по длине прутков.

В станках со скользящими ножами (рис. 4), движущимися вместе с проволокой, проволоку 2 отрезает гильотинный нож 1. Равномерность длины прутков обеспечивается регулировкой тянущих роликов. Обычно станки, работающие «до упора», и станки со

скользящими ножами допускают регулировку длины прутков в широком диапазоне.

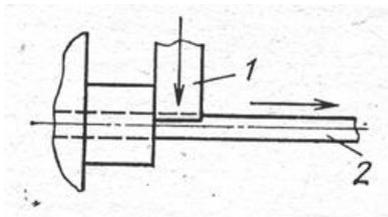


Рис. 4. Гильотинный нож:  
1 – нож; 2 – проволока

Обычно рубленые стержни поступают в приемник, оборудованный приспособлением для периодического сброса прутков в контейнер или на транспортер. Правильно-отрезные автоматы высокой производительности с выдачей до 450 прутков в минуту оборудованы дополнительным приемным транспортером, который принимает прутки и передает их в приемник-укладчик. Оттуда прутки периодически сбрасываются на транспортер, ведущий к прутковому питателю электрообмазочного пресса, если оборудование установлено в линию, или в контейнер рубленых стержней.

Рубка высоколегированной проволоки требует специализированного оборудования, что связано с ее повышенной прочностью, жесткостью, твердостью, вязкостью, меньшей длиной стержней.

Готовые стержни должны отвечать следующим требованиям:

1. Предельные отклонения длины стержней должны соответствовать стандартизованным предельным отклонениям длины электродов и не должны превышать 3,0 мм для электродов первой группы и 2,0 мм для изготовления электродов второй и третьей групп.

2. Стрела прогиба должна удовлетворять следующим требованиям:  
– не более 0,3 мм для электродов длиной от 250 до 300 мм;  
– не более 0,4 мм для электродов длиной от 300 до 350 мм;  
– не более 0,5 мм для электродов длиной свыше 350 мм.

3. Величина заусенцев и волнистость стержней должны обеспечить возможность их свободного прохождения через контрольные втулки длиной 60 мм.

4. Угол среза проволоки по отношению к оси стержня для всех диаметров должен находиться в пределах 72–90°. Угол среза контролируется шаблоном.

## **2.2. Подготовка покрытия**

Компонентов для покрытия электродов современных марок достаточно много. Некоторые поступают на предприятия в виде порошков, готовых к применению, какие-то — в виде крупных или мелких кусков, которые нуждаются в определенной переработке. По установившейся практике компоненты перерабатываются, как правило, в дробильно-размольных отделениях электродных цехов.

Качество электродов определяется не только маркой стали стержня и рецептурой покрытия. Оно в большой степени зависит от правильной подготовки порошков компонентов, входящих в состав покрытия. Металлургические процессы, протекающие при плавлении электродов, обеспечивают необходимый химический состав и механические свойства наплавленного металла только при отсутствии засорения одних компонентов другими, при соблюдении требований к гранулометрическому составу ферросплавов и порошков металлов. Поэтому очевидно, что качество электродов закладывается в дробильно-размольном отделении электродного производства.

Некоторые материалы поступают навалом в виде крупных кусков, часто загрязненных посторонними примесями. В связи с этим перед их измельчением и классификацией (просевом) они нуждаются в предварительной мойке и сушке. Другие материалы поступают в виде порошков, готовых к применению, упакованных в металлическую или мягкую тару.

Многие кусковые и порошковые материалы поступают на склад в таре. Растваривание материалов является ответственной операцией. При небрежном ее выполнении возможны неоправданно высокие потери дорогостоящих и дефицитных материалов. Помимо этого при растаривании ферросплавов появляется опасность перепутывания их отдельных плавок, существенно различающихся содержанием ведущего легирующего элемента, что может привести к неисправимому браку электродной продукции.

При растаривании материалов необходимо соблюдать следующие условия:

- емкость для растаривания должна быть чистой, сухой, без щелей и отверстий; если растаривание производится на площадку, то она также должна быть чистой, ровной и сухой;
- в данный момент следует растаривать только материал одной партии, а ферросплавы – одной плавки;
- растаренный материал необходимо снабжать биркой с четко написанным наименованием материала, номера партии, марки и плавки (при ее наличии).

Порошковые материалы, например плавиковый шпат, которые должны пройти контрольный просев, растаривают на специальной установке с механическим ситом. Контрольный просев имеет целью гарантировать отсутствие в материале случайных посторонних включений.

Порошковые материалы, такие, как молибден, никель, рэлит, карбид хрома и др., поступающие в металлических или пластмассовых банках, как правило, не нуждаются в контрольном просеве. Поэтому их целесообразно растаривать на месте дозировки.

Некоторые материалы электродных покрытий поступают на производство со значительными загрязнениями. Это в первую очередь относится к кусковым рудным и нерудным материалам, поступающим навалом, таким, как гематит, мрамор, доломит, полевой шпат, силикатная глыба, плавиковый шпат (кусковой) и др. Для промывки кусковых материалов могут быть использованы специализированные моечные установки.

Схема измельчения материалов электродных покрытий с доведением их до необходимого гранулометрического состава определяется конкретными условиями данного электродного производства. Однако для всех электродных производств, измельчающих кусковые материалы, основными и необходимыми операциями являются: крупное дробление, среднее дробление и тонкое измельчение с последующей классификацией для отделения материала требуемой грануляции.

Для крупного дробления применяются щековые дробилки, обеспечивающие наряду с высокой производительностью и высокую

степень сокращения – в пределах 5–6 (степень сокращения – это отношение размеров куска материала до и после дробления).

Типовым оборудованием для среднего дробления кусковых материалов является валковая дробилка с гладкими валками. Валковые дробилки просты по конструкции, надежны в эксплуатации и обладают высокой производительностью, обеспечивая степень сокращения в пределах 3–5. Процесс дробления сводится к раздавливанию кусков материала между гладкими валками, вращающимися навстречу друг другу.

Для тонкого измельчения применяют шаровые и стержневые мельницы. В первых мелющими телами служат стальные шары, во вторых – металлические стержни. Наиболее распространены шаровые мельницы. При измельчении материалов в стержневых мельницах готовый продукт содержит меньше мелких фракций, чем при измельчении в шаровых.

После дробления или измельчения материала для электродных покрытий его необходимо разделить по крупности частиц. Для выполнения этой задачи применяют грохоты (для разделения кускового материала), а для мелкого материала – сита различной конструкции или воздушные классификаторы (сепараторы).

Наиболее широко распространены механические и вибрационные сита. Обычно при просеве на ситах получают два класса – надрешетный (с размером частиц больше размера ячейки сита) и подрешетный (с размером частиц меньше размера ячейки сита). Некоторые конструкции сит имеют несколько рабочих сеток и рассчитаны на получение нескольких классов материала по крупности.

Для большинства материалов на ситах можно обеспечить довольно полное выделение годной фракции. Трудно это осуществить для материалов, склонных к слипанию (магнезит, доломит, мрамор, двуокись титана и др.). При их просеве на вибрационных ситах с латунной сеткой, имеющей размер ячейки в свету 300–400 мкм, в надрешетном материале содержится много годного. Во всех случаях полнота выделения годного материала при просеве в большой степени зависит от свойств материала, его влажности, а также от равномерности подачи материала на площадь сетки.

### 2.3. Компоненты для покрытий

Для обеспечения технологичности изготовления и применения электродов, достижения требуемых служебных характеристик выполняемых электродами сварных соединений на металлический стержень электрода наносят покрытие, состоящее из порошков различных компонентов. Поэтому современные электродные покрытия являются сложными многокомпонентными системами.

Все сырье, применяемое для покрытий, можно в зависимости от выполняемых ими главных функций разбить на следующие группы:

- 1) шлакообразующие (рудные и неметаллические ископаемые или продукты их переработки);
- 2) легирующие (главным образом ферросплавы, реже чистые металлы или их окислы);
- 3) газообразующие (обычно пищевая или техническая органика);
- 4) цементирующие (почти во всех случаях растворимый силикат натрия);
- 5) стабилизирующие (соли и соединения, содержащие калий, натрия, реже соединения, содержащие кальций).

Основными видами сырья группы шлакообразующих являются рудные и неметаллические ископаемые. Из руд, применяемых при изготовлении покрытий для электродов, почти исключительное применение нашли руды, содержащие титан и марганец.

Руды, содержащие титан. Титан в виде окислов входит составной частью в ряд минералов, из которых наиболее широкое применение при изготовлении электродов получил титановый концентрат. Он является продуктом переработки кусинских титаномагнетитовых руд и представляет собой мелкозернистый материал тёмно-серого цвета с металлическим блеском. Средний анализ кусинских титаномагнетитовых руд показывает следующий их состав: Fe – 53,14 %; TiO<sub>2</sub> – 14,0 %; V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0,54 %; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,67 %; SiO<sub>2</sub> – 2,47 %; S – 0,14 %; P – 0,007 %.

Введение в покрытие электродов сырья, содержащего окислы титана, имеет целью:

- 1) увеличить скорость плавления электродов с тонким покрытием; наличие окислов титана в покрытии электродов повышает про-

изводительность сварки на 15–20 % по сравнению с другими электродами со стабилизирующим покрытием;

2) получить шлак определённых физико-химических свойств. В результате взаимодействия двуокиси титана в шлаке с закисью железа, растворенной в наплавленном металле, образуются титанаты. Это приводит к снижению содержания кислорода в металле шва. Присутствие двуокиси титана в шлаке повышает скорость его затвердения, что дает возможность применять электроды с толстым покрытием при сварке вертикальных и потолочных швов.

Титановый концентрат помимо основного минерала – ильменита ( $\text{FeTiO}_3$ ) содержит много различных минералов, из которых одни являются балластом, а другие – вредными примесями. Например, кварц,  $\text{SiO}_2$  нежелателен как балласт. Пирит,  $\text{FeS}_2$ , вреден как содержащий серу.

Руды, содержащие марганец. Промышленным сырьем, содержащим марганец, является марганцевая руда, которая представляет собой конгломерат различных по составу и физическим свойствам минералов.

Так же как и титановый концентрат, марганцевая руда способствует получению быстро затвердевающих шлаков. Совместное применение титанового концентрата и марганцевой руды в покрытиях лучших марок электродов для сварки малоуглеродистой стали (ОММ-5, АН-5) дало возможность разрешить проблему универсальности электродов (сварка в нижнем, вертикальном и потолочном положениях).

В марганцевой руде вредным для сварки элементом является фосфор. Его удаление путем предварительного обогащения руды весьма затруднительно. Объясняется это минералогической структурой марганцевой руды.

Удаление фосфора в процессе сварки также затруднительно, так как для надежного закрепления фосфора в шлаке требуются следующие условия:

- 1) высокое содержание железа в шлаке;
- 2) высокое содержание извести в шлаке;
- 3) высокое содержание кремнекислоты в шлаке;

- 4) высокое содержание марганца в шлаке;
- 5) относительно низкая температура процесса.

В процессе дуговой сварки марганцевая руда может служить не только шлакообразующим компонентом, но и до некоторой степени легирующим.

К группе неметаллических ископаемых относят наибольшее количество видов электродного сырья. Рассмотрим основные из них.

Полевой шпат в электродном покрытии выполняет роль шлакообразующего компонента и стабилизатора. В электродной промышленности применяются преимущественно калиевые полевые шпаты. Значительное содержание полевого шпата в покрытии приводит к образованию жидкотекучих шлаков, затрудняющих сварку в вертикальном и потолочном положениях; в наплавленном металле при этом растет количество неметаллических включений.

Мел в электродном покрытии является стабилизатором, шлакообразующим, а также газообразующим компонентом за счет выделения  $\text{CO}_2$  при диссоциации  $\text{CaCO}_3$ .

Плавленый шпат, плавик, или флюорит, в электродном покрытии является шлакообразующим компонентом, имеющим назначение создать шлак определенного состава и повысить его реакционную способность.

Плавленый шпат ( $\text{CaF}_2$ ) способствует разжижению шлака путем образования эвтектики  $\text{CaOSiO}_2\text{CaF}_2$ , которая содержит около 38 %  $\text{CaF}_2$  и имеет температуру плавления  $1130^\circ$ . Образование эвтектики повышает растворимость  $\text{CaO}$  в шлаке, понижает его вязкость и способствует удалению серы из металла.

Каолин в покрытии электродов играет роль шлакообразующего компонента и совместно с титановым концентратом способствует получению быстро затвердевающих шлаков, что необходимо для электродов, применяемых при вертикальной и потолочной сварке.

При большом содержании каолина в покрытии, свыше 20 %, отмечены следующие негативные моменты при сварке:

- 1) исключительно большая пластичность и объёмная усадка: первая затрудняет изготовление электродов опрессовкой при ручной их приемке на машине; вторая может служить причиной появления трещин на покрытии при сушке электродов;

2) выделение водяных паров в момент сварки, чем объясняются выплески металла из сварочной ванны, наблюдаемые иногда при сварке электродами указанных марок.

Кварц ( $\text{SiO}_2$ ) применяется как шлакообразующий компонент, обеспечивающий надлежащий состав шлака и влияющий определенным образом на его физико-химические свойства. С ростом содержания кварца в шлаке растет вязкость последнего и облегчается его удаление со шва.

Значительное содержание кварца в покрытии может явиться причиной засорения наплавленного металла неметаллическими включениями.

В качестве легирующих компонентов в покрытии электродов применяются почти исключительно ферросплавы, значительно реже – окислы металлов и компоненты, содержащие углерод (древесный уголь, графит).

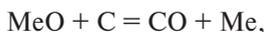
Ферросплавы вводят в покрытие с целью:

- 1) компенсировать угар легирующих элементов из металла проволоки;
- 2) снизить содержание вредных соединений в металле путем перевода их в менее вредные для качества металла соединения ( $\text{MnS}$  вместо  $\text{FeS}$ ,  $\text{MnO}$  вместо  $\text{FeO}$  и др.);
- 3) изменить в желаемом направлении химический состав наплавленного металла путем введения в него легирующих элементов через покрытие.

Переход легирующего элемента из покрытия в наплавленный металл определяется рядом факторов. Главнейшие из них: количество легирующего компонента в покрытии; степень его физической раздробленности; состав шлака, получающегося в процессе сварки; толщина покрытия. При изготовлении электродов нашли применение только простые сплавы. До сих пор там, где необходимо наличие двух легирующих или раскисляющих элементов, вводят соответственно два простых сплава. При изготовлении электродов большое применение получили ферромарганец, феррохром, ферросилиций, ферротитан, меньшее – ферромолибден, феррованадий, ферровольфрам. Все они представляют собой сплав железа с элементом, входящим в название сплава.

Графит получил незначительное применение как легирующий компонент. Как правило, он является составной частью покрытия электродов для твёрдых наплавов и сварки чугуна.

Виды газообразующих компонентов весьма разнообразны. Роль, выполняемая ими, сводится к созданию (за счёт горения и пирогенетического разложения компонента) вокруг зоны сварки восстановительной или нейтральной газовой среды, возможно полностью изолирующей расплавляемый металл от действия азота и кислорода воздуха. Углерод газообразующих составляющих играет до некоторой степени роль раскислителя. Раскисление можно выразить уравнением в общем виде:



где MeO – окисел металла.

Из материалов, вводимых в покрытие в качестве газообразующих компонентов, можно назвать крахмал, целлюлозу, декстрин, пищевую муку, древесную муку, торфяную муку, пеньковый шпагат, хлопчатобумажную нить, навиваемую на проволоку в виде сетки, просмоленную или простую бумажную ленту и т. п.

В условиях отечественной промышленности наиболее широкое применение получили крахмал, пищевая мука; реже применяют древесную и торфяную муку. Наиболее широко применяется картофельный крахмал.

Декстрин представляет собой продукт неполного гидролиза крахмала при его нагревании или при действии на него кислот.

Получение декстрина сводится обычно к нагреванию сухого крахмала до температуры 180–200° или к нагреванию крахмала с соляной или азотной кислотой до 120–130°. Наиболее распространён второй, так называемый кислотный способ, так как он протекает при более низкой температуре за более короткий срок (2–4 часа вместо 10–15 часов).

Древесная мука, применяемая при изготовлении электродов, представляет собой продукт, полученный в результате нагрева опилок от деревьев хвойных пород в печи без свободного доступа воздуха (при 300–350 °С), последующего их измельчения и просева.

Цементирующий компонент в покрытии выполняет следующие функции:

- а) придаёт покрытию необходимую подвижность, вязкость и клейкость, дающие возможность наносить покрытие на прутки;
- б) даёт возможность получить после сушки и прокатки покрытие, обладающее необходимой механической прочностью;
- в) обеспечивает влагоустойчивость покрытия после сушки и прокатки.

Наиболее полно перечисленным требованиям отвечает растворимый силикат, известный также под названием жидкого стекла или силикат-раствора.

Растворимый силикат влияет также на химический состав шлака и на его физические свойства. Эти изменения могут повлечь за собой появление дефектов в наплавленном металле (неметаллические включения, газовые поры).

Стабилизирующие вещества вводятся в покрытие с целью повысить устойчивость горения дуги при сварке. В некоторых случаях возможность вести сварку на переменном токе достигается лишь при условии введения в состав покрытия стабилизирующего компонента.

Общим для всех стабилизаторов является наличие в них группы соединений щелочных металлов (калия, натрия, кальция). Практически для этой цели служат сода ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) или поташ ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ).

Помимо перечисленных выше компонентов в покрытия для повышения производительности могут вводить до 70 % железного порошка при одновременном увеличении толщины покрытия. Однако применение в нашей стране данных высокопроизводительных электродов очень невелико – не более 1 % – из-за ограниченного выпуска трансформаторов с напряжением холостого хода 80 В, дефицитности железного порошка, сложности качественного нанесения таких покрытий на поточных линиях.

Другой вариант повышения производительности – применение в сварочных материалах экзотермических смесей [3]. Так, разработан состав электродного покрытия, содержащий мрамор, плавленый шпат, рутиловый концентрат, окалину, алюминиевый порошок, ферротитан и ферромарганец в количествах, достаточных для образования экзотермической смеси, обеспечивающей протекание

экзотермических реакций. Введение экзотермической смеси позволяет повысить производительность до 30 %.

## **2.4. Нанесение покрытий**

Нанесение массы покрытия на стержни осуществляется окунанием или опрессовкой [1]. В настоящее время нанесение покрытия окунанием применяется при изготовлении малых партий специальных электродов. Для электродов общего назначения, а также специальных, но применяемых достаточно широко, изготавливаемых массово или крупными партиями, покрытия наносят опрессовкой под высоким давлением. Применение технологии опрессовки позволяет использовать смесь с меньшим содержанием воды. Кроме того, исключена последующая операция шлифовки покрытия для устранения значительной концентричности.

Стержни, подаваемые на операцию опрессовки, должны иметь температуру, близкую к температуре цеха и температуре обмазочной массы. Использование стержней с повышенной температурой сразу после рубки влечет за собой быстрое высыхание слоев электродного покрытия, прилегающих к стержню, что влечет за собой появление трещин в покрытии. Применение холодной проволоки чревато снижением адгезионных свойств покрытия и его отслоением от стержня.

В общем виде технология приготовления и нанесения покрытий сводится к измельчению всех компонентов в несколько стадий (от грубого к тонкому), просеиванию на ситах, приготовлению обмазочной пасты с требуемой консистенцией, нанесению ее на стержень методом опрессовки. Сначала смешиваются сухие компоненты, потом к ним добавляется связующее вещество, силикатные растворы – натриевые, реже калиевые жидкие стекла. В покрытиях при сварке они одновременно ионизируют дуговой промежуток и влияют на формирование состава шлака. В зависимости от метода нанесения покрытия на стержни – окунание или опрессовка – применяются жидкие стекла различной плотности. Они характеризуются модулем, плотностью, вязкостью и клеящей способностью. На вязкость существенно влияет температура жидкого стекла. Важной характеристикой жидкого стекла для оценки состава электродных покрытий является величина сухого остатка.

Нанесение пасты производится на специальных прессах под высоким давлением. При этом обращается особое внимание на концентричность расположения стержня относительно покрытия с целью обеспечения его равномерности.

Для нанесения покрытия применяют прессы различной конструкции (схема, рис. 5, и общий вид прессы, рис. 6). Обмазочную смесь подают в воронку (10) корпуса (1) при помощи механизма подачи (не показан) непрерывно или порциями в количестве, необходимом для непрерывного заполнения камеры прессования (7) и выхода обмазочных электродов; посредством шестерни (4) обеспечивают вращение шнека (3) и подачу обмазываемых стержней (9). Обмазочная масса захватывается лопастями шнека и, ограниченная от вращения ребрами (2) корпуса (1), уплотняется и подается в камеру прессования (7) через сегменты (6) опоры (5).

Здесь на стержень (9) наносится обмазка, размеры и форма которой определяются калибрующей фильерой (8). Опрессованные электроды подаются на приемный транспортер, а затем на зачистную машину для зачистки торца и контактного конца.

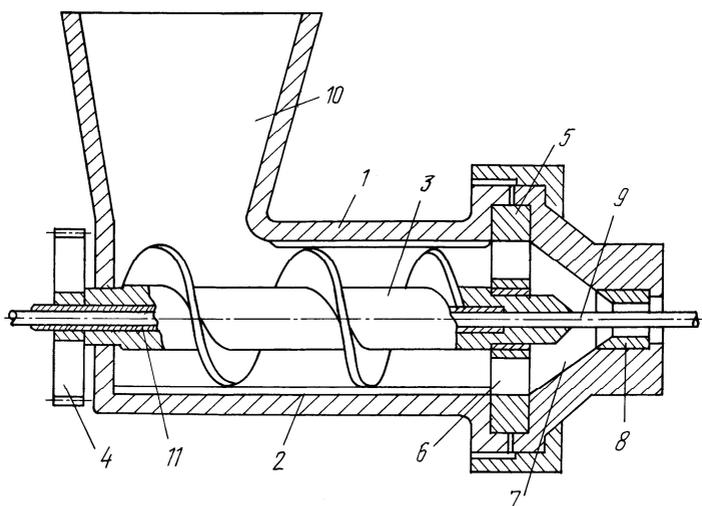


Рис. 5. Схема прессы для нанесения покрытия на стержень



Рис. 6. Пресс для нанесения покрытия

В прессах любых конструкций наиболее ответственной частью является обмазочная головка. Именно в ней происходит покрытие электродного стержня обмазочной массой.

Головка (рис. 7) состоит из корпуса (1), куда из обмазочного цилиндра по каналу (2) поступает обмазочная масса. Под углом к каналу (2) расположена свеча (3) для подвода прутков с образованием двух продольных каналов (4) для прохождения массы, расположенных диаметрально противоположно друг другу. Элементы головки образуют обмазочную камеру (5), на выходе из которой устанавливают калибрующую втулку.

Непосредственно после нанесения обмазки на электрод зачистная машина удаляет с одного конца электрода покрытие под зажим электрододержателя, с другого — зачищает торец для обеспечения электрического контакта при начале сварки. Благодаря высокому давлению опрессовки электроды выходят из головки электродообмазочного пресса с покрытием, имеющим достаточную прочность, чтобы не разрушаться и не деформироваться во время продвижения к узлу зачистки и во время самой зачистки.

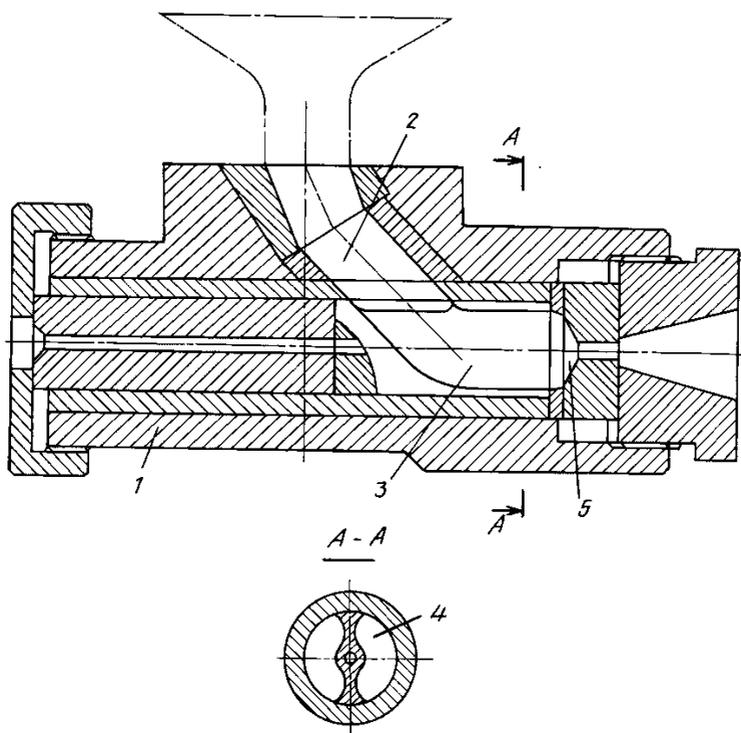


Рис. 7. Схема головки для нанесения покрытия

До узла зачистки электроды проходят через систему, выравнивающую электроды по контактному торцу, затем поступают под прокатчик. На современных зачистных машинах прокатчик выполнен в виде плоско-ременного устройства, лентами которого электроды прижимаются к лентам главного транспортера. Скорость вращения прокатчика, имеющего индивидуальный привод, значительно превышает скорость движения электродов по лентам главного транспортера. Поэтому электроды, попадая под прокатчик и будучи прижаты им к ленте, начинают вращаться, приобретая вращательно-поступательное движение. В процессе движения под прокатчиком расстояние между электродами увеличивается, что снижает вероятность взаимного повреждения покрытия электродов. На некоторых зачистных машинах прокатчик выполнен в виде вращающегося барабана, армированного мягкой резиной или поролоном.

Практика показывает преимущества плоско-ременного, так называемого танкового прокатчика. Однако при его применении предъявляются повышенные требования к резино-техническим изделиям, которыми оснащена зачистная машина.

При прохождении электродов под прокатчиком происходит их зачистка от покрытия в соответствии с нормами ГОСТ 9466-75. Зачистку от покрытия под электрододержатель производят двумя вращающимися навстречу друг другу металлическими щетками; зачистку контактного торца с противоположной стороны осуществляют обычно вращающейся фрезой с алмазным напылением. Щетки и фреза имеют отдельные приводы.

После зачистки электроды отправляются на термообработку. Полный цикл термообработки включает предварительную сушку (подвяливание, провяливание), окончательную сушку, прокалку и охлаждение. В некоторых случаях из-за малой влажности обмазочной пасты операцию сушки пропускают, отправляя электроды сразу на прокалку, температура которой колеблется в зависимости от вида покрытия – от 150 до 400 °С и выше.

Термообработку электродов проводят с целью придания покрытию достаточной механической прочности при содержании в нем влаги в пределах, как способствующих нормальному протеканию сварочного процесса, так и позволяющих обеспечить заданный химический состав и свойства наплавленного металла и сварных соединений. Обычно тепловые режимы полного цикла термообработки электродов, изготовленных с применением растворов жидкого стекла в качестве связующего, наряду с механической прочностью обеспечивают и влагостойкость покрытия (кроме целлюлозных электродов).

Подвяливание электродов (атмосферная сушка) – промежуточная операция термообработки, проводимая для постепенного (мягкого) удаления влаги из электродного покрытия при температурах, близких или несколько превышающих нормальную, и при невысокой относительной влажности окружающей среды.

Под сушкой электродов понимают более интенсивное удаление влаги при температуре примерно до 80 °С в условиях обязательного удаления увлажненного воздуха от мест сушки. Прокалка электро-

дов, температура которой зависит от вида электродного покрытия и назначения электродов, призвана обеспечить доведение остаточной влажности покрытия до установленных норм.

Охлаждение электродов должно быть проведено в условиях, обеспечивающих его постепенность, диктуемую существенными различиями коэффициентов линейного расширения покрытия и стержня.

Сушка и прокалка электродов требуют обеспечения условий постепенной отдачи влаги электродным покрытием при нагреве и выдержке, одновременности и равномерности процесса по всей длине электрода.

На процессы подвяливания, сушки и прокали электродов оказывают влияние состав электродного покрытия, материал и диаметр электродного стержня, толщина электродного покрытия (на сторону), газопроницаемость покрытия, зависящая от гранулометрического состава шихты, вид и количество органических веществ, температура и относительная влажность воздушной среды, скорость движения воздуха, вид и количество жидкого стекла в покрытии, взаимное расположение электродов и скорость образования поверхностной пленки.

Сразу после опрессовки электродов влажность покрытия составляет обычно 9–12 %. Допустимое содержание влаги после термообработки зависит от вида покрытия и назначения электродов. Так, электроды с основным покрытием, предназначенные для сварки ответственных конструкций из углеродистых и низколегированных сталей, должны иметь влажность не более 0,2 % от массы покрытия (определение влажности проводят с доведением навески покрытия при температуре  $400 \pm 10$  °С до постоянной массы). Для обеспечения указанной влажности прокалку электродов надо производить при температуре 360–400 °С в течение достаточно длительного времени.

Электроды с рутиловым и кислым покрытием содержат в рецептуре органику (целлюлозу, крахмал и др.), создающую газовую защиту сварочной ванны, снижая чувствительность к пористости.

В связи с этим высокая температура прокали таких покрытий недопустима, так как при этом органические составляющие выго-

рают и газовая защита резко ухудшается. Поэтому температура прокаливания таких электродов не должна превышать 185–190 °С. Влажность покрытия указанных электродов определяют после прокаливания при температуре 180 +10 °С, она может достигать 1,5 %.

Покрытие целлюлозных электродов в основном состоит из целлюлозы. Для обеспечения нормальных сварочно-технологических свойств таких электродов необходима определенная влажность покрытия: после сушки при 110 +5 °С до постоянной массы она должна находиться в пределах 0,5–2 %. Поэтому электроды прокалывают при температуре 155–160 °С в течение 15 минут.

При неправильно выбранных форсированных режимах термообработки электродов отмечены такие дефекты покрытия, как трещины различного вида, вспухание, недостаточная его прочность или прочность сцепления со стержнем, местные глубокие вмятины от транспортных устройств. Наличие трещин вызывает неравномерное плавление покрытия, что в ряде случаев может привести к недостаточной защите сварочной ванны от воздействия атмосферы воздуха. Это особенно заметно проявляется при сварке в вертикальном и потолочном положениях. Электродные покрытия, имеющие трещины, быстрее набирают влагу, нежели электроды со сплошным покрытием. Кроме того, при наличии трещин прочность покрытия, как правило, снижается, может происходить опадание кусочков покрытия. Иногда после термообработки на покрытии появляется сетка мелких трещин, невидимых невооруженным глазом (они становятся различимы после легкого смачивания покрытия водой). Такой дефект резко снижает прочность покрытия, что может негативно сказаться уже при транспортировке электродов. Образование сетки трещин связано с разрушением под влиянием создавшегося внутри покрытия давления паров наружной корочки, образующейся при быстрой влагоотдаче с поверхности покрытия за счет повышенной скорости воздушного потока.

Жесткий режим сушки электродов обычно приводит к вспуханию покрытия электродов и снижению его прочности; возможно отделение покрытия от стержня, появление зазора между покрытием и стержнем на торце электрода. При этом вспухание может увеличить имеющуюся разнотолщинность покрытия, так как за-

твердевание покрытия со стороны меньшей толщины будет происходить быстрее.

Таким образом, термообработка электродов является весьма ответственным процессом.

Сортировка и упаковка электродов – заключительные технологические операции цикла изготовления электродов. При сортировке электродов визуально определяют наличие дефектов на поверхности покрытия.

Годные электроды упаковывают в коробки или пачки. Прямой функцией упаковки является защита электродов от механических воздействий, порчи, загрязнений, увлажнения. Однако существуют и дополнительные требования. Это прежде всего требования экологичности упаковки – упаковочные материалы должны быть пригодны для переработки и повторного использования, не загрязнять окружающую среду. Кроме того, упаковка должна обеспечивать сохранность качества и количества продукции на всех этапах ее транспортировки, перемещения, хранения; обеспечивать удобство погрузки, выгрузки, перевозки электродов на всех видах транспорта с учетом максимального использования грузоподъемности транспортных средств; облегчать проведение работ, связанных со складским хранением электродов; обеспечивать возможность проведения не только оптовых, но и мелкооптовых и розничных продаж без дополнительных переупаковок.

Электроды могут упаковываться:

- в герметизируемые пластмассовые коробки (пеналы);
- в пачки, завернутые в оберточную бумагу, с последующим упаковыванием пачек в герметизируемые металлические коробки (пеналы);
- в коробки из коробчатого картона толщиной не менее 0,7 мм или равноценного им по характеристикам с последующим герметичным упаковыванием каждой коробки в полиэтиленовую пленку толщиной 0,1–0,2 мм или в полиэтиленовую термоусадочную пленку;
- в пачки, завернутые в оберточную бумагу с последующим упаковыванием каждой пачки в герметичную оболочку из полиэтиленовой пленки толщиной 0,1–0,2 мм;

- в коробки из коробчатого картона по ГОСТ 7933-89 толщиной не менее 0,8 мм;
- в пачки, завернутые в двухслойную упаковочную бумагу марок Б-70, Б-80 или Г-80 по ГОСТ 8828-89, или в мешочную влагопрочную бумагу марок В-70 или В-78 по ГОСТ 2228-89, или в равноценную им по характеристикам.

В мировой практике для низководородистых электродов с основным покрытием используют не предусмотренную отечественным стандартом вакуумную упаковку. При этом количество электродов, рассчитанное на использование в течение половины рабочей смены, упаковывают в вакууме во внутренние твердые пластиковые пакеты и обтягивают усадочной прочной воздухонепроницаемой фольгой. Такая упаковка обеспечивает возможность использования электродов без дополнительной повторной прокатки. Однако технически потребность в ней невелика, она достаточно дорога, и поэтому ее применяют ограниченно.

Масса электродов в коробке или пачке не должна превышать:

- 3 кг – для электродов диаметром до 2,5 мм;
- 5 кг – для электродов диаметром 3,0–4,0 мм;
- 8 кг – для электродов диаметром свыше 4,0 мм.

На (в) каждой коробке или пачке с электродами должна находиться этикетка или маркировка, содержащая следующую информацию:

- а) наименование или товарный знак предприятия-изготовителя;
- б) условное обозначение электродов;
- в) номер партии и дата изготовления;
- г) область применения электродов;
- д) режимы сварочного тока в зависимости от диаметра электродов и положения сварки или наплавки;
- е) особые условия выполнения сварки или наплавки;
- ж) механические и специальные свойства металла шва, наплавленного металла или сварного соединения, не указанные в условном обозначении электродов;
- з) допустимое содержание влаги в покрытии перед использованием электродов;
- и) режим повторного прокаливания электродов;
- к) масса электродов в коробке или пачке.

Кроме того, каждая партия электродов должна сопровождаться сертификатом, удостоверяющим соответствие электродов требованиям настоящего стандарта и стандартам или техническим условиям на электроды данной марки. В сертификате указывают следующую информацию:

- наименование или товарный знак предприятия-изготовителя;
- условное обозначение электродов;
- номер партии и дата изготовления;
- масса нетто партии в килограммах;
- марка проволоки электродных стержней с указанием обозначения стандарта или технических условий;
- фактический химический состав наплавленного металла;
- фактические значения показателей механических и специальных свойств металла шва, наплавленного металла или сварного соединения, являющихся приемо-сдаточными характеристиками электродов конкретной марки.

При приемке партии электродов заказчиком проверяется информация, указанная в сертификате, а также сохранность упаковки. При обнаружении повреждения или порчи упаковки или самих материалов вопрос о возможности использования этих материалов решает руководитель сварочных работ предприятия совместно с отделом технического контроля (службой технического контроля) предприятия (организации).

В зависимости от требований, предъявляемых к качеству (точность изготовления, состояние поверхности покрытия, сплошность выполненного данными электродами металла шва и содержание серы и фосфора в наплавленном металле), электроды подразделяются на группы в порядке возрастания качества — 1, 2 и 3. На разных заводах-изготовителях электроды одной и той же марки могут изготавливаться по разным группам качества, которые устанавливаются при аттестации электродов. Отечественная промышленность выпускает, как правило, электроды только первой группы. Стандартом нормируются предельные отклонения электродов по длине, их кривизна, состояние поверхности, прочность покрытия и концентричность его нанесения, обязательные требования к сварочно-технологическим свойствам электродов.

На практике определяющим является требование по концентрации покрытия.

На заводе-потребителе электроды должны храниться отдельно по маркам, партиям и диаметрам на специальных стеллажах в сухих отапливаемых помещениях. Наиболее рационально хранение электродов в герметичной упаковке или таре. Температура в помещении должна быть не ниже 15 °С, относительная влажность не выше 60 %. Для получения требуемой относительной влажности рекомендуется применение кондиционеров. Хранение допускается в штабелях высотой 1 м и массой до 1 т. При хранении аустенитных электродов в указанных условиях более трёх месяцев их необходимо перед применением просушить при температуре 120–150 °С с выдержкой 2 ч. При хранении электродов в сушильных шкафах при температуре 50–80 °С срок их годности не ограничен.

Необходимо избегать излишнего дополнительного прокаливания электродов, снижающего механическую прочность покрытия.

### **Контрольные вопросы**

1. С какой целью прокаливают электроды с нанесенным покрытием?
2. Требования к покрытиям, нанесенным на стержень электрода.
3. Как наносят покрытие на стержень электрода?
4. Какие возможны варианты упаковки электродов перед отправкой потребителю?
5. Как получают стержни электрода на заводе-изготовителе?
6. К чему может привести быстрая сушка электродов с нанесенным покрытием?
7. Каковы требования к упаковке для электродов?
8. Преимущества использования технологии опрессовки при нанесении покрытий.
9. Каковы функции цементирующего компонента в покрытии?
10. Как правят проволоку, предназначенную для изготовления электродных стержней?
11. На какие группы, в зависимости от главных функций, делят сырье, применяемое для подготовки покрытий?

### 3. ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ СВАРКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Для сварки конструкционных сталей могут быть применены электроды широкой номенклатуры (типы Э42-Э50А, ГОСТ 9467-75). Важным при выборе электродов для сварки конструкционных сталей является получение металла шва, равнопрочного основному. Это обеспечивается выбором требуемого типа сварочного электрода, регламентирующего прочностные характеристики сварного соединения. Также следует помнить, что применение электродов с повышенными механическими свойствами наплавленного металла, например, по пределу прочности при растяжении, может привести к снижению работоспособности сварной конструкции.

Сложнее обстоит дело с выбором марки электрода, которая зависит от типа покрытия. Различные марки электродов, относящиеся к одному и тому же типу по ГОСТ 9467-75, как правило, близки по механическим свойствам металла шва (за исключением низкотемпературных свойств). Поэтому разработчикам технологии следует производить их выбор с учётом особенностей сварочно-технологических характеристик и производственных возможностей.

Для сварки кипящих сталей (низкоуглеродистая сталь, выпускаемая из печи слабоокисленной) могут быть использованы электроды с любым покрытием.

Для сварки полуспокойных сталей (сталь, полученная при раскислении жидкого металла менее полно, чем при выплавке спокойной стали, но большем, чем при выплавке кипящей стали) при больших толщинах лучше применять электроды с покрытиями основного или рутилового видов.

Сварка конструкций из спокойной стали, работающих при низких температурах или при динамических нагрузках, должна выполняться электродами с основным покрытием.

Также на качество швов и на возможность сварки переменным током влияет стабильность горения дуги. Наиболее стабильно дуга горит у электродов с целлюлозным, кислым и рутиловым покрытиями. Это позволяет применять в качестве источника питания дуги сварочные трансформаторы. Для электродов с основным покрытием требуются только источники постоянного тока.

В нижнем, вертикальном и потолочном положениях шов лучше формируется у электродов с целлюлозным покрытием, так как мелкокапельный перенос электродного металла и высокая вязкость шлака обеспечивают качественное ведение сварки. Хуже формируются шов у электродов с основным покрытием.

При сварке толстостенных конструкций многослойными швами отделяемость шлака является существенным показателем. Электроды с рутиловым, целлюлозным и кислым покрытиями обеспечивают лучшую отделяемость шлака по сравнению с основным покрытием.

Сварка электродами с основным покрытием требует тщательной очистки кромок от ржавчины, масла, грязи во избежание порообразования. Кроме того, электроды с основным покрытием склонны к порообразованию в начальный момент сварки и при сварке длинной дугой.

К электродам Э42 относят марки АНО-5, АНО-6М, ОМА-2, АНО-17, ОЗС-23. Кисло-целлюлозные электроды ОМА-2 и рутиловые электроды ОЗС-23 выпускают диаметром до 3 мм. Предназначены они для сварки различных изделий из тонколистовых сталей (толщиной до 3 мм). Сварку производят на постоянном и переменном токе во всех пространственных положениях.

Обе марки характеризует слабая чувствительность к пористости при сварке по окисленной поверхности и при удлинении дуги. Высокая стабильность горения электродов ОЗС-23 обеспечивает возможность применения в качестве источников питания трансформаторов. При сварке электродами марки ОЗС-23 рекомендуется использовать максимальные значения сварочного тока.

Рутиловые электроды марки АНО-5 с железным порошком в покрытии обладают повышенной производительностью и рекомендуются для сварки швов, особенно угловых, большой протяженности. Повышенная производительность также отличает электроды АНО-17, имеющие покрытие на базе ильменитового концентрата и железного порошка. Иногда применяют ильменитовые электроды марки АНО-6М.

Из электродов типа Э42А наиболее часто применяют широко известные электроды марки УОНИ-13/45, которые обеспечивают

необходимые свойства сварных соединений при повышенных требованиях по пластичности и ударной вязкости. Ограниченное применение находят электроды марки УП-1/45.

Электроды УОНИ-13/45 применяют для сварки особо ответственных конструкций из углеродистых и низкоуглеродистых сталей, когда к металлу швов предъявляют повышенные требования по пластичности и ударной вязкости. Покрытие электродов основное. Сварку можно выполнять во всех пространственных положениях шва постоянным током обратной полярности на короткой длине дуги. Перед сваркой требуется зачистка кромок.

Также основное покрытие и у электродов УП-1/45. Технологические характеристики у них аналогичны УОНИ-13/45, но можно вести сварку на переменном токе. Прочностные характеристики наплавленного металла не уступают УОНИ-13.

Электроды типа Э46 занимают ведущее место в объёме выпуска и применения металлических покрытых электродов в России. К данному типу электродов относят марки АНО-4, ОЗС-12, ОЗС-4, ОЗС-6, МР-3, АНО-13, АНО-18. Среди них наиболее распространены рутиловые низкотоксичные электроды марок МР-3, АНО-4, ОЗС-4. Электроды МР-3 выпускаются диаметром 3–6 мм. Сваривать такими электродами можно детали толщиной 3–20 мм. Для работы с электродами МР-3 могут быть использованы источники постоянного (обратная полярность) и переменного тока. Используемые источники тока должны обеспечивать напряжение холостого хода не менее 50 В. Электроды марки МР-3 позволяют выполнять работы во всех пространственных положениях.

Аналогичные характеристики электродов АНО-4 и ОЗС-4. Только сварка постоянным током электродами АНО-4 может производиться на прямой и обратной полярности. А электроды ОЗС-4 могут применяться во всех пространственных положениях, кроме вертикального сверху вниз.

Высокопроизводительные электроды АНО-19 и АНО-20 обеспечивают стабильность процесса сварки при использовании стандартных трансформаторов с напряжением холостого хода 65 В. У них также рутиловое покрытие.

Электроды АНО-19 предназначены для сварки конструкций из углеродистых, низколегированных (типа 09Г2) сталей и комбинаций низкоуглеродистых со среднеуглеродистыми (сталь Ст3 + сталь Ст5) сталей. Сварка в нижнем и вертикальном положении на постоянном токе любой полярности и переменном токе.

Электроды АНО-20 предназначены для сварки углеродистых и низколегированных (типа 09Г2) сталей в нижнем и наклонном положениях на постоянном (прямая полярность) и переменном токе. По производительности они не уступают известным электродам АНО-1, для которых требуются источники питания с высоким напряжением холостого хода. Хорошая электропроводность покрытия обеспечивает лёгкое повторное возбуждение и стабильное горение дуги, что позволяет использовать электроды для сварки коротких швов.

К электродам повышенной производительности относятся универсальные рутиловые электроды АНО-18 ( $\alpha_n = 10,5 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$ ), обладающие большей технологичностью в изготовлении, которые заменяют электроды АНО-5.

Они позволяют производить сварку углеродистых сталей средних и больших толщин в заводских условиях, где преимущественное количество швов выполняется в нижнем положении.

Повышенной производительностью также обладают электроды ОЗС-6. Коэффициент наплавки –  $10,0 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$ . Они позволяют выполнять сварку переменным током и постоянным током обратной полярности во всех пространственных положениях. Покрытие электродов рутиловое.

Следует помнить, что коэффициент наплавки  $\alpha_n$  не является полной характеристикой производительности труда при сварке, он не учитывает различий в силе сварочного тока. Поэтому технологу при выборе марки электрода следует принимать во внимание данные о часовой производительности. Они дают более полную оценку производительности сварки ( $\alpha_n \cdot I_{св}$ , кг/ч, где  $\alpha_n$  – коэффициент наплавки). Производительность при сварке некоторыми электродами диаметром 4 мм при сварке в нижнем положении на средних токах приведена в табл. 3.1. Однако этот показатель также не учитывает разницу в линейной скорости сварки.

## Производительность сварки и расход электродов

Марка (покрытие)	Производительность, кг/ч	Коэффициент наплавки, $\alpha$	Расход электродов на 1 кг наплавленного металла
АНО-5 (Б)	2,1	11	1,6
АНО-17 (РА)	2,1	10,5	1,65
УП-1/55 (Б)	1,8	10	1,6
ОЗС-20Р (РБ)	1,7	12	1,7
АНО-4 (Р)	1,6	9	1,6
ОЗС-18 (Б)	1,5	9,5	1,5
ОЗС-25 (Б)	1,4	9,5	1,6
МР-3 (Р)	1,2	8,5	1,6
УОНИ-13/45 (Б)	1,1	8,5	1,5

Повысить производительность сварки можно за счёт получения вогнутых швов при высокой линейной скорости сварки. Такие швы получают при использовании рутиловых электродов ОЗС-12. Эти электроды предназначены для сварки во всех пространственных положениях на постоянном и переменном токе ответственных конструкций из углеродистых и низколегированных сталей.

Они характеризуются высокими сварочно-технологическими свойствами и обеспечивают формирование вогнутых мелкочешуйчатых швов лёгким (часто самопроизвольным) отделением шлака.

Электроды ОЗС-12 лучше применять для сварки тавровых соединений и швов трубопроводов.

Ручная электродуговая сварка вертикальных швов выполняется, как правило, технологическим способом «снизу вверх» (на подъём). При этом значения сварочного тока ограничены, что связано с необходимостью уменьшения объёма и жидкотекучести сварочной ванны. Повышения производительности за счёт роста сварочного тока можно достичь использованием способа сварки «сверху вниз» (на спуск), для которого предназначены, в частности, электроды АНО-13. Это электроды с рутилово-целлюлозным покрытием. Сварка

допускается на постоянном токе прямой полярности и переменном токе. Данные электроды лучше применять для сварки вертикальных угловых, нахлесточных и стыковых с разделкой швов способом «сверху вниз». Для обеспечения стабильного процесса сварки и высокого качества металла шва электроды перед употреблением необходимо просушить при температуре 100–120 °С в течение 30–40 мин.

В последние годы разработаны и выпускаются промышленностью электроды на базе менее дефицитного сырья.

Так, для производства электродов ОЗС-21 используется ильменитовый концентрат. Электроды предназначены для сварки ответственных конструкций из углеродистых сталей во всех пространственных положениях на постоянном токе любой полярности и переменном токе. Они характеризуются высокими сварочно-технологическими свойствами, в том числе лёгкой отделимостью шлака, позволяют производить сварку удлиненной дугой и по окисленной поверхности. Электроды обеспечивают стабильно высокие механические свойства металла шва, в том числе ударную вязкость при положительных и отрицательных температурах. Возможна сварка как на переменном токе, так и на постоянном обратной полярности.

Универсальные рутиловые электроды АНО-14 имеют в покрытии рутила на 20 % меньше, чем электроды АНО-4, и не содержат слюды и целлюлозы. К их преимуществам при сварке относятся возможность применения форсированных режимов, малая склонность к образованию пор в угловых швах. В остальном по свойствам и назначению они идентичны электродам АНО-4.

К электродам типа Э46А относятся электроды марок УОНИ-13/55К, АНО-8 и ОЗС-22Р. При производстве электродов УОНИ-13/55К строго контролируется химический состав наплавленного металла не только по вредным примесям, но и по содержанию углерода, кремния и марганца, входящих в приемоудачные характеристики электродов. За счёт оптимизации состава обеспечиваются стабильно высокие свойства металла шва при динамических нагрузках и его хладостойкость.

Высокими сварочно-технологическими свойствами характеризуются электроды марки ОЗС-22Р с рутилово-основным покрытием.

ем, предназначенные для сварки конструкций из углеродистых и низколегированных сталей, в частности 09Г2 и 10ХСНД. По механическим свойствам металла шва эти электроды эквивалентны традиционным электродам серии УОНИ-13, но превосходят последние по некоторым показателям сварочно-технологических свойств (возможность сварки на постоянном токе любой полярности и на переменном токе при использовании стандартных источников питания; возможность сварки вертикальных швов способом «сверху вниз»; более высокая производительность за счёт большого коэффициента наплавки и большей плотности тока при сварке). Электроды обеспечивают низкое содержание водорода в металле шва. Существенным их достоинством является и высокая технологичность в условиях промышленного поточного производства.

Группа электродов типа Э50А предназначена главным образом для сварки низколегированных сталей и обеспечивает требуемые свойства за счёт легирования наплавленного металла.

Электроды ОЗС-20Р по технологическим характеристикам аналогичны электродам ОЗС-22Р, но обеспечивают получение металла шва с более высокими прочностными характеристиками.

Для сварки ответственных конструкций из низколегированных атмосферо-коррозионно-стойких сталей 10ХНДП, 10ХСНД, 15ХСНД предназначены электроды ОЗС-18 с основным покрытием. Металл шва характеризуется низким содержанием водорода и равноценной с основным металлом стойкостью против атмосферной коррозии. Сварка во всех пространственных положениях шва постоянным током обратной полярности.

Для сварки изделий из стали 09Г2С, эксплуатируемых в диапазоне температур – 70...+475 °С, предназначены электроды марки ВП-4 с основным покрытием. В отличие от других марок электродов типа Э50А, изготавливаемых из проволоки Св-08 и Св-08А, они рассчитаны на использование легированной проволоки Св-10НЮ. Сварка во всех пространственных положениях, кроме «сверху вниз», на постоянном токе обратной полярности.

Электроды марки ВП-6, предназначенные для сварки сталей 09Г2С и 10Г2, эксплуатирующихся при высоком давлении и температуре до –70 °С, разработаны на базе проволоки Св-10НМА.

Использование этих электродов позволяет не проводить после сварки нормализацию сварных соединений. Электроды допускают сварку во всех пространственных положениях, кроме «сверху вниз», на постоянном токе обратной полярности. Покрытие основное.

Наиболее высокие характеристики по хладостойкости сварных соединений обеспечивают электроды ОЗС-24М, предназначенные для сварки особо ответственных конструкций из низколегированных хладостойких перлитных сталей 09Г2С, 06Г2АБ, 10ХГНМАЮ, 12Г2АФЮ и др. В частности, они рекомендуются для сварки стыков трубопроводов, транспортирующих охлаждённый ( $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) природный газ. Рациональная система легирования наплавленного металла из проволоки (марки Св-06НЗ по ГОСТ 2246-70) и покрытия основного вида, оптимальное содержание легирующих элементов в наплавленном металле обеспечивают стабильно высокие значения механических свойств стыков, выполненных в различных пространственных положениях. Электроды отличают наиболее высокие характеристики ударной вязкости металла шва при низких температурах. К достоинствам относится возможность сварки во всех пространственных положениях шва. Покрытие основное, сварка постоянным током обратной полярности. Электроды ОЗС-24М обеспечивают также низкое содержание диффузионного водорода (до  $2\text{ см}^3/100\text{ г}$  наплавленного металла) и неметаллических включений в металле шва. Электроды обладают высокими сварочно-технологическими свойствами: коэффициент наплавки –  $9,5\text{ г/А} \cdot \text{ч}$ ; производительность наплавки (для диаметра  $4,0\text{ мм}$ ) –  $1,4\text{ кг/ч}$ .

### **Контрольные вопросы**

1. Что важно при выборе электродов для сварки конструкционных сталей?
2. Какие покрытия электродов в наибольшей степени обеспечивают устойчивое горение дуги?
3. Для чего сушат (прокаливают) электроды перед сваркой?
4. Характеризует ли коэффициент наплавки данного электрода в полной мере его производительность?

#### 4. ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ СВАРКИ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Легированными называют стали, содержащие помимо углерода и обычных примесей другие элементы, называемые легирующими, изменяющие механические, физические и химические свойства сталей в нужном направлении.

В качестве легирующих элементов могут применять хром, никель, марганец, кремний, ванадий, вольфрам, молибден, кобальт, титан, алюминий, медь и другие элементы. Причем марганец считается легирующим компонентом лишь при содержании его в стали свыше 1 %, а кремний – при содержании свыше 0,8 %.

В зависимости от суммарного количества легирующих элементов, которые содержат легированные стали, они могут принадлежать к одной из трех категорий: низколегированные (не более 2,5 %); среднелегированные (не более 10 %); высоколегированные (от 10 до 50 %).

Стандартом ГОСТ 9467-75 предусмотрены электроды для сварки легированных конструкционных сталей повышенной и высокой прочности (типы Э70, Э85, Э100 и Э150) и ряд типов электродов для сварки легированных теплоустойчивых сталей. Среди них широко известны марки УОНИ-13/85, НИАТ-3М, ЦЛ-17 и др.

В ряде случаев для изготовления тяжело нагруженных сварных конструкций применяют высокопрочные стали 14Х2ГМР, 14ХГНМ, 12ГН2МФАЮ, для сварки которых предназначены электроды с основным видом покрытия АНП-2 (тип Э70). Электроды допускают сварку во всех положениях, кроме вертикального «сверху вниз». Постоянный ток обратной полярности. Могут применяться при ремонте транспортных и строительных машин, работающих в условиях низких температур. Наплавленный металл легирован хромом, никелем и молибденом.

Типу Э85 соответствуют электроды марок НИАТ-3М и УОНИ-13/85, предназначенные для сварки на постоянном токе ответственных и особо ответственных конструкций. Нормированные значения механических свойств металла шва обеспечиваются после термообработки по предписанным режимам (закалка + отпуск). Режимом термообработки можно обеспечить более высокие прочностные свойства.

Сварочно-наплавочные электроды ОЗШ-1 (тип Э100) применяют для сварки легированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву в основном до 1080 МПа (110 кгс/мм<sup>2</sup>). Покрытие основное. Сварка во всех пространственных положениях шва постоянным током обратной полярности. Сварка проводится только на короткой дуге.

Электроды ЦУ-2ХМ с основным покрытием предназначены для сварки хромомолибденовых сталей типа 15ХМ, 20ХМ и других, работающих при температуре до 520 °С. Сварка во всех пространственных положениях, кроме вертикального сверху вниз, постоянным током обратной полярности. Сварку выполнять на короткой длине дуги по очищенным кромкам.

Их применяют также для основного слоя (из сталей тех же марок) двухслойной стали.

Электроды ТМЛ-4В (тип Э-09Х1М) с основным покрытием применяют для исправления дефектов в литых корпусных деталях турбин и паровой арматуры из сталей 20ХМЛ, 20ХМФЛ, 15Х1М-1ФЛ, 12МХЛ, работающих при температуре до 565 °С. Последующей термической обработки отремонтированного участка не требуется. Сварка во всех пространственных положениях, кроме вертикального сверху вниз, постоянным током обратной полярности.

Электроды ЦЛ-17 (тип Э-10Х5МФ) предназначены для сварки ответственных конструкций из хромомолибденовых сталей 15Х5И 12Х5МА и 15Х5МФА, работающих в агрессивных средах при температуре 450 °С. Сварка во всех пространственных положениях шва постоянным током обратной полярности. Покрытие основное. Для данных электродов характерна высокая производительность, коэффициент наплавки – 10,0 г/А · ч, производительность наплавки (для диаметра 4,0 мм) – 1,5 кг/ч.

Электроды ОЗС-11 (тип Э-09МХ) применяют для сварки конструкций из сталей 12МХ, 15МХ, 12ХМФ, 12Х1М1Ф и им подобных, работающих при повышенной температуре (до 510 °С). Сварку осуществляют постоянным и переменным током. При толщине металла более 12 мм рекомендуется предварительный и сопутствующий подогрев до 150–200 °С.

Сварку стыков трубопроводов из сталей 12МХ, 15МХ, 12Х1М1Ф, 20ХМФЛ, работающих при температуре до 540 °С, а также элементов поверхностей нагрева из сталей 12Х1МФ, 12Х2МФСР и 12Х2МФБ, независимо от рабочей температуры, производят электродами ТМЛ-1У (тип Э-09Х1М).

Для выполнения стыков трубопроводов из теплоустойчивых перлитных сталей, работающих при температуре 570 °С, применяют электроды ТМЛ-3У (тип Э-09Х1МФ) и ЦЛ-20-67. Электроды ТМЛ-1У и ТМЛ-3У допускают осуществление сварки в узкие разделки.

Все марки электродов для сварки легированных сталей имеют основные покрытия и предназначены для сварки постоянным током обратной полярности. Сварку теплоустойчивых сталей производят с предварительным и сопутствующим подогревом, температура которого для разных марок различна. Заданные механические свойства металла шва обеспечиваются после высокого отпуска по паспортным режимам.

Широко применяемые высоколегированные стали и сплавы различного состава и назначения классифицируют по следующим группам: коррозионно-стойкие стали, двухслойные и разнородные стали, жаростойкие стали и никелевые сплавы.

Разнообразие условий работы оборудования из таких материалов и требований к свойствам сварных соединений, сварочно-технологическим свойства электродов диктует необходимость использования широкой гаммы сварочных электродов. Специфическими особенностями физических свойств высоколегированных сталей и сплавов являются пониженные температура плавления и теплопроводность, высокие электросопротивление и коэффициент линейного расширения. Именно эти особенности и определяют поведение высоколегированных сталей и сплавов при сварке. Из-за низкой теплопроводности и высокого электросопротивления скорость плавления, следовательно, и коэффициент наплавки у высоколегированных электродов достигают высоких значений. Повышенное электросопротивление металла стержней обуславливает применение укороченных стержней и малых плотностей сварочного тока. Последнему способствует также низкая теплопроводность металла, приводящая к повышенной глубине проплавления.

Сварка сталей и сплавов коррозионно-стойких, жаростойких, жаропрочных и износостойких имеет свои особенности и сопряжена с некоторыми трудностями, связанными со склонностью к образованию трещин, выделением карбидов, различной технологичностью применяемых при сварке присадочных материалов, а также склонностью сварных соединений к локальным разрушениям в процессе эксплуатации. Эта склонность значительно снижается в случае применения после сварки высокотермической обработки (аустенизации).

По технологической свариваемости аустенитные стали и сплавы также могут быть разбиты на следующие группы: стали, свариваемые без ограничений; стали ограниченно свариваемые; трудносвариваемые стали.

В группу сталей, свариваемых без ограничений, можно отнести марки 08X16H9M2, 12X18H10, 12X18H10T и другие, химический состав которых характеризуется отношением эквивалентов хрома и никеля, равным 1,3–1,6.

Эквиваленты хрома и никеля для данных сталей можно рассчитать по следующим приближенным формулам:

$$[\text{Cr}] = \text{Cr} \% + 1,5 \text{ Si} \% + \text{Mo} \% + 0,8 \text{ V} \% + 0,5 \text{ Nb} \% + \\ + \text{W} \% + 3,5 \text{ Al} \% + 4 \text{ Ti} \%;$$

$$[\text{Ni}] = \text{Ni} \% + 0,5 \text{ Mn} \% + 0,5 \text{ Cu} \% + 30 \text{ C} \% + 30 \text{ N} \%.$$

Для сварки данных сталей следует применять аустенитно-ферритные электроды, обеспечивающие высокую трещиностойкость металла шва. В околошовной зоне сталей этой группы горячих трещин, как правило, не наблюдается. Стали этой группы в меньшей степени склонны к локальным разрушениям.

К группе ограниченно свариваемых сталей можно отнести марки 12X18H12T, 20X23H18 (ЭИ 417), 08X16H23M2Б (ЭИ 405), 10X16H14B2БР (ЭП 17) и другие, с отношением эквивалентов хрома и никеля близким к единице. Сварка производится аустенитно-ферритными электродами.

К группе трудносвариваемых относят стали и сплавы марок 45X14H14B2M (ЭИ 69), 08X15H24B4TP (ЭП 164), ХН35ВТ (ЭИ 612) и другие, с отношением эквивалентов хрома и никеля меньше единицы. Эти материалы склонны к образованию горячих трещин

в околшовной зоне. В связи с этим приходится использовать электроды малого диаметра (не более 3 мм).

В характеристике свариваемости для некоторых материалов рекомендуются электроды, специально разработанные для их сварки.

Самую обширную группу сталей и соответственно электродов составляют коррозионно-стойкие материалы, основная номенклатура и условия, применение которых приведено в табл. 3. Следует отметить, что по химическому составу и структуре наплавленного металла такие электроды часто существенно отличаются от аналогичных характеристик свариваемых материалов. Даже при одинаковом составе свойства листового проката и литого металла шва будут различны, например, по пределу текучести из сталей типа 18–10 примерно 1,5 раза.

Таблица 3

Электроды для сварки высоколегированных  
коррозионно-стойких сталей и сплавов

Марка свариваемой стали	Марка электрода	Максимальная температура эксплуатации сварных соединений, °С	
		без требований по МКК	при наличии требований по МКК
08X18H10 12X18H9	ОЗЛ-8	Не ограничено	Не применяются
	ОЗЛ-14А, ОЗЛ-36	500	
08X18Г8Н2Т 08X22Н6Т 09X18Н10Т 12X18Н9Т 12X18Н9Т 08X18Н12Б 10X18Н9ТЛ	ОЗЛ-8	Не ограничено	350 (при 350–450 – после стабилизирующего отжига)
	ОЗЛ-14А, ОЗЛ-36	500	
	ОЗЛ-7, ЦЛ-11, Л-38М, Л-40М	450	
	ЦТ-15, АНВ-23	Не ограничено	
03X18Н1 03X19АГ3Н10	ОЗЛ-22	450	
	АНВ-13	Не ограничено	
10X14Г14Н4Т 03X13АГ19 07X13АГ20	ОЗЛ-8, ОЗЛ-14А, ОЗЛ-36, ОЗЛ-7, ЦЛ-11, Л-38М, Л-40М	350 (без требования равнопрочности металла шва основному металлу)	
	АНВ-24	500	

Марка свариваемой стали	Марка электрода	Максимальная температура эксплуатации сварных соединений, °С	
		без требований по МКК	при наличии требований по МКК
08X17H13M2T 08X17H15M3T	ОЗЛ-20, АНВ-17	Не ограничено	350 (после подтверждения стойкости МКК сварных соединений конкретных плавок стали)
	АНВ-26		Не применяется
	ЭА-400/10У	450	
10X17H13M2T 10X17H13M3T 08X21H6M2T	НЖ-13, СЛ-28	(В интервал 450–700 при содержании феррита до 6 %)	350
03X18AG3H11 МЗБ 03X17H14M3 03X21H21M4ГБ	ОЗЛ-20, ОЗЛ-17У	Не ограничено	
	АНВ-17	Для внутренних многослойных сварных швов, не обращённых к коррозионной среде	Не применяется
06ХН28МДТ 03ХН28МДТ	ОЗЛ-17У, ОЗЛ-37-2	–	350
	АНВ-28	Для внутренних многослойных сварных швов, не обращённых к коррозионной среде, а также для прихватки металла толщиной более 10 мм	350 (после подтверждения коррозионной стойкости испытаниями в конкретной среде)
10X23H18	ОЗЛ-6	Не ограничено	–
08X13	УОНИ-13/ НЖ12Х13, ОЗЛ-6	350	Не применяется

Механические свойства металла шва, получаемого при использовании электродов, указанных в табл. 3, приведены в табл. 4.

Основные характеристики электродов для сварки  
коррозионно-стойких сталей

Электрод		Механические свойства металла шва		
Марка	Тип, по ГОСТ 10052-75	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$a_H$ , Дж/см <sup>2</sup>
УОНИ-13/НЖ12Х13	Э-12Х13	650	25	105
ОЗЛ-14А	Э-04Х20Н9	665	39	155
ОЗЛ-36	Э-04Х20Н9	620	37	175
АНВ-13	Э-02Х19Н9Б	540	30	120
АНВ-23	Э-08Х20Н9Г2Б	550	30	80
АНВ-24	Э-08Х15Н9АГ4	550	30	80
ОЗЛ-7	Э-08Х20Н9Г2Б	665	36	120
ОЗЛ-8	Э-07Х20Н9	605	41	155
ЦЛ-11	Э-08Х20Н9Г2Б	660	34	120
Л-38М	Э-08Х20Н9Г2Б	588	30	88
Л-40М	Э-08Х20Н9Г2Б	620	24	80
ЦТ-15	Э-08Х19Н10Г2Б	610	33	130
ОЗЛ-20	Э-02Х20Н14Г2М2	635	37	165
НЖ-13	Э-09Х19Н10Г2М2Б	645	33	120
СЛ-28	Э-09Х19Н10Г2М2Б	590	38	120
ЭА-400/10У	05Х18Н11М3ГФ	540	30	90
ЦЛ-4	Э-06Х19Н11Г2М2	640	32	100
АНВ-17	Э-02Х19Н18Г5АМ3	550	30	120
АНВ-20	03Х19Н16Г5М2АВ2	675	36	185
АНВ-26	Э-08Х18Н12Г4М2	550	30	100
ДС-12	08Х20Н10Г6Б	590	22	70
ОЗЛ-6	12Х17Н13С4	780	25	65
ОЗЛ-14А	02Х17Н14С5	690	28	90
ОЗЛ-17У	04Х22Н7Б	710	26	150
ОЗЛ-20	Э-02Х20Н14Г2М2	630	36	170
ОЗЛ-22	Э-02Х21Н10Г2	670	34	200
ОЗЛ-36	Э-04Х20Н9	620	37	180

До последнего времени в отечественной практике для сварки высоколегированных сталей применяли в основном электроды с основными покрытиями. Мнение о необходимости использования только таких покрытий часто относят к общим правилам руч-

ной дуговой сварки высоколегированных сталей всех марок. Оно обусловлено опасностью развития кремнийвосстановительного процесса, протекающего при низкой основности покрытий, и возможностью снижения вследствие этого свойств металла шва. Рутитовые и рутилкарбонатные покрытия начали применять сравнительно недавно.

Производственный опыт свидетельствует о равноценности свойств сварных соединений, выполненных электродами с различными типами покрытий, по многим ведущим показателям.

В то же время требование обеспечения необходимой коррозионной стойкости металла шва может накладывать жёсткие ограничения по типам электродных покрытий.

Рост применения сверхнизкоуглеродистых коррозионно-стойких сталей ( $C < 0,03 \%$ ) выдвигает проблему получения сверхнизкоуглеродистого наплавленного металла. При сварке электродами с основными покрытиями происходит науглероживание наплавленного металла. Концентрация углерода повышается за счёт взаимодействия металла с углекислым газом, образующимся при диссоциации карбонатов. Наиболее резко это происходит уже при содержании карбонатов до  $15 \%$  от массы покрытия.

Данные статистики по промышленным маркам электродов, предназначенных для сварки коррозионно-стойких сталей, показывают, что науглероживание составляет  $0,020-0,040 \%$  для основных покрытий и  $0,015-0,020 \%$  для рутитовых с малым содержанием карбонатов. Для швов на сверхнизкоуглеродистых сталях это недопустимо.

По указанным причинам для сварки сверхнизкоуглеродистых сталей нашли применение электроды с бескарбонатными рутитовыми покрытиями, обеспечивающие практическое отсутствие науглероживания.

Применяются также электроды с малым содержанием карбонатов при введении сильных окислителей в покрытие, что даёт, однако, менее стабильные результаты по концентрации углерода в наплавленном металле.

Применимость тех или иных электродов часто определяют их сварочно-технологические характеристики, существенно завися-

щие от металлургического типа покрытия. Электроды с основными покрытиями позволяют получать шлаки малой жидкотекучести и предпочтительны для швов, выполняемых в пространственных положениях, отличных от нижнего. Электроды с рутиловыми покрытиями обеспечивают более гладкую поверхность швов, лёгкую отделимость шлака, мягкое горение и слабое разбрызгивание. Повышенная жидкотекучесть шлаков обеспечивает их лёгкое передвижение и повышенную скорость сварки. Рутиловые электроды обеспечивают небольшое проплавление основного металла, что является положительным фактором при сварке высоколегированных сталей. По отделимости шлака также предпочтительны рутиловые высоколегированные электроды.

При ручной дуговой сварке высоколегированных сталей и сплавов рекомендуется обратная полярность тока. Это позволяет избежать перегрева электрода, сопутствующего сварке на прямой полярности из-за большого в этом случае напряжения на дуге.

Одной из основных задач при сварке конструкций из высоколегированных сталей является достижение достаточной стойкости швов против образования горячих трещин. Радикальным средством является обеспечение двухфазной структуры металла шва за счёт  $\delta$ -феррита, интерметаллидов, карбидов и пр. При двухфазной структуре металла шва его стойкость против трещин не зависит от типа покрытий.

При сварке стабильно аустенитных сталей и сплавов или при необходимости обеспечения однофазной структуры шва для борьбы с горячими трещинами успешно применяют легирование молибденом и марганцем. Это позволяет достичь стойкости против трещин даже в условиях протекания кремневосстановительного процесса, характерного для рутиловых электродов.

Электроды ОЗЛ-22 предназначены для сварки аппаратуры, работающей в окислительных средах типа азотной кислоты, из низкоуглеродистых хромоникелевых сталей типа 04X18H10 (ЭИ 842), 03X18H12, 03X18H11 и им аналогичных. Они обеспечивают лёгкую отделимость шлаковой корки. Металл шва характеризуется высокой общей коррозионной стойкостью (Ук – 0,25 мм/год – метод Д, ГОСТ 6032-75) и стойкостью против МКК. Аналогично

назначение электродов АНВ-13; наплавленный ими металл стабилизирован ниобием.

Электроды ОЗЛ-20 предназначены для сварки аппаратуры из низкоуглеродистых хромоникельмолибденовых аустенитных сталей марок 03X18H15M3 (ЭИ 844), 03X17H14M2 и им аналогичных, а также стали 08X17H15M3Т (ЭИ 580), когда к металлу шва предъявляются жёсткие требования по стойкости против МКК. Высокая коррозионная стойкость и достаточная технологическая прочность обеспечиваются малой концентрацией углерода и лимитированным в узких пределах минимальных значений содержанием ферритной фазы.

Сварку указанных сталей и сталей 10X17H13M2/3/Т производят также электродами АНВ-17, дающими металл шва с чисто аустенитной структурой.

Электроды АНВ-17 могут быть рекомендованы и для более высоколегированных сталей.

Стали карбамидного класса работают в жестких условиях синтеза карбамида (при температуре от  $-70$  до  $+200$  °С и давлении до  $200$  Н/мм<sup>2</sup>). К таким сталям относится отечественная сталь 02X25H22AM2-ПТ.

#### *Электроды для сварки двухслойных сталей*

Двухслойные стали выпускают согласно ГОСТ 10885-85 «Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионно-стойкая». В таких сталях основной слой составляет низкоуглеродистая, низколегированная сталь: сталь 3 сп; сталь 10; сталь 20К; 09Г2; 16ГС; 09Г2С; 10ХСНД; 10ХГСН1Д; 12МХ; 10Х2М1. Плакирующий слой выполняют из легированных и высоколегированных сталей: 08Х13; 08Х17Т; 15Х25Т; 08Х18Н10Т; 12Х18Н10Т; 10Х17Н13М2Т; 10Х17Н13М3Т; 08Х17Н15М3Т; 08Х22Н6Т; 06ХН28МДТ; ХН65МВ; ХН65МВУ.

Причем на стали 3 сп, 10 допускается нанесение слоя никеля, на сталь 3 сп и сталь 20К допускается нанесение слоя монеля – НМ-ЖМц 28-2,5-1,5.

Сварка двухслойных сталей ведется согласно ГОСТ 16092-80. Образование сварного соединения при сварке двухслойных сталей имеет ряд особенностей, обусловленных наличием в сварном соединении двух разнородных металлов, у которых физические и механические свойства отличаются. Поэтому сварку основного слоя

и наплавку плакирующего слоя ведут отдельно, применяя разные присадочные материалы так, чтобы снизить нежелательное перемешивание металлов.

В качестве основного способа сварки двухслойной стали принята следующая схема последовательности:

- сварка основного слоя шва материалами, рекомендованными для стали этого слоя;
- выполнение переходного слоя шва;
- выполнение плакирующего слоя шва.

Возможно выполнение сварки другими способами, в которых совмещаются функции переходного и плакирующего швов за счет применения соответствующих сварочных материалов или сварки полностью аустенитными материалами и др.

Сварочные материалы для основного слоя должны обеспечивать механические свойства металла шва или наплавленного металла не ниже марки стали основного слоя.

Особенности сварки и наплавки двухслойных сталей с основным слоем из низколегированных теплоустойчивых сталей типа 12ХМ помимо общих требований к сварке двухслойных сталей включают дополнительные требования. Так, необходим предварительный и сопутствующий подогрев при сварке основного слоя, причем сварку надо проводить без перерыва. Однако многослойная сварка, наплавка плакирующего (коррозионностойкого) слоя производится без подогрева, при этом каждый проход выполняется после охлаждения предыдущего до температуры не выше 100 °С.

При выборе электродов, установлении оптимальных методов и режимов сварки плакирующего слоя надлежит всесторонне учитывать особенности образования коррозионно-стойкого шва. При наплавке на конструкционную сталь высоколегированной стали необходимо использовать электродные материалы аустенитного класса с достаточным запасом аустенитности для предотвращения образования хрупких участков с мартенситной структурой в первом слое. Таким образом, предпочтительными являются электроды со стержнем из высоконикелевой проволоки.

Значения предельных долей участия конструкционной стали в высоколегированном наплавленном металле, до которых сохраня-

ются удовлетворительные эксплуатационные свойства, твердость и относительное удлинение аустенитного шва, выполненного различными сварочными материалами, приведены в табл. 5.

Для наибольшего приближения свойств исходного высоколегированного присадочного металла к свойствам металла наплавки необходимо обеспечивать минимально возможную долю участия основной углеродистой (низколегированной) стали в шве.

Таблица 5

Предельные доли участия конструкционной стали  
в высоколегированном наплавленном металле

Доля участия, %	Электроды	
	Марка	Тип
30	ОЗЛ-6, ЦЛ-9, ЗиО-8	Э-10Х25Н13Г2, Э-10Х25Н13Г2Б Э-10Х25Н13Г2
45	ЭА-395/9, АНЖР-3У, АНВ-17, НИАТ-5, ЦТ-10	Э-11Х15Н25М6АГ2 Э-08Х24Н25М3Г2 Э-02Х19Н18Г5АМ3 Э-11Х15Н25М6АГ2 Э-11Х15Н25М6АГ2
60	АНЖР-1, АНЖР-2	Э-08Х25Н60М10Г2 Э-06Х25Н40М7Г2

Например, для сочетания сталей СтЗсп + 08Х13 сварку основного слоя выполняют электродами УОНИ-13/55. Вначале проваривают корень шва электродами диаметром 3 мм, полярность обратная, сила тока 70–90 А, затем заполняют разделку электродами диаметром 4 мм, сила тока 130–140 А. Плакирующий слой заваривают электродами ЭА-395/9 диаметром 4 мм при силе тока 150–190 А. Сварка электродами ЭА-395/9 производится во всех пространственных положениях, кроме вертикального «сверху вниз», на постоянном токе обратной полярности. Покрытие данных электродов основное.

### **Контрольные вопросы**

1. Почему длина плавящихся покрытых электродов для сварки высоколегированных сталей больше, чем низкоуглеродистых низколегированных?
2. Почему при сварке высоколегированных сталей рекомендуется использовать прямую полярность?
3. Могут ли кремний и марганец быть легирующими компонентами?
4. В чем особенности сварки двухслойных сталей?
5. Для чего определяют эквиваленты хрома и никеля для сталей?

## **5. ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ СВАРКИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И ЧУГУНА**

К цветным относят большинство конструкционных металлов за исключением железа и его сплавов с углеродом (сталь, чугун). Цветные металлы и их сплавы при нагреве сильнее взаимодействуют с окружающим воздухом, чем черные. В результате этого взаимодействия ухудшаются физико-механические свойства сварных соединений, что оказывает влияние на технологию сварочных работ. Оксиды большинства цветных металлов, как правило, имеют температуру плавления больше, чем самого металла. В результате в сварном шве появляются оксидные включения, что отражается на его качестве. У большинства цветных металлов теплопроводность значительно больше, чем у стали. Поэтому сварочная ванна охлаждается быстро. Кроме того, приходится соответствующим образом подбирать источники питания сварочной дуги, режимы сварки. В некоторых случаях необходим предварительный и сопутствующий подогрев. Количество цветных металлов, используемых в практической деятельности человека, очень велико. Поэтому рассмотрим далее только те, которые соединяются технологией сварки.

### **5.1. Электроды для сварки меди и ее сплавов**

Медь — один из первых металлов, который человек начал использовать для своих нужд. У этого металла теплопроводность в шесть раз выше, чем у железа. Чистая медь обладает низкой прочностью, но высокой пластичностью. Поэтому даже в холодном состоянии чистая медь легко подвергается деформациям, что накладывает ограничения на ее использование в конструкционных целях. Для устранения данного недостатка применяют сплавы меди (бронза, латунь).

Для дуговой сварки меди и ее сплавов могут применяться плавящиеся электроды «Комсомолец-100», ОЗБ-2М, ОЗБ-3, АНЦ/ОЗМ-2, АНЦ/ОЗМ-3, АНЦ/ОЗМ-4.

Электроды «Комсомолец-100» предназначены для дуговой сварки и наплавки меди марок М1, М2, М3. Необходим предварительный подогрев свариваемых изделий. Диаметр выпускаемых электродов 3,0, 4,0 и 5,0 мм. Длина электродов диаметром 3 и 4 мм —

350 мм, 5 мм – 450 мм. Для производства электродных стержней применяется медная проволока марки МТ согласно ГОСТ 2112-79, изготовляемая из медной катанки марки М1 согласно ГОСТ 859-78. Состав электродного покрытия: ферромарганец – 50 %; жидкое стекло (в качестве связующего) – 20 %; полевого шпата – 12 %; плавиковый шпат – 10 %; ферросилиций – 8 %.

Электроды марки ЗТ Балтийского завода представляют собой стержень из бронзы КМц-3-1 (3 % кремния, 1 % марганца, остальное – медь). Диаметр стержня 4–6 мм. Покрытие следующего состава: ферросилиций – 32 %; плавиковый шпат – 10 %; марганцевая руда – 17,5 %; графит – 16 %; алюминий (порошок) – 2,5 %. В качестве связующего применяют жидкое стекло. Толщина защитного покрытия 0,4 мм.

Применение бронзовых стержней обеспечивает лучшее формирование шва, но металл раскисляется хуже, чем при использовании медных стержней.

Сварка меди электродами ЗТ и «Комсомолец» производится на постоянном токе обратной полярности, короткой дугой при перемещении электрода лишь поступательно (без колебаний). Сила тока должна быть достаточной для обеспечения устойчивого горения дуги.

Например, для электрода «Комсомолец-100» рекомендуемые значения силы тока приведены в табл. 6.

Таблица 6

Рекомендуемая сила тока

Диаметр электрода, мм	Положение шва	
	Нижнее	Наклонное
3	90–110	140–180
4	120–140	100–120
5	170–190	150–170

Электроды марки ОЗБ-2М предназначены для сварки и наплавки бронз, в первую очередь оловянно-фосфористых и художественных, наплавки на сталь и бронзу и для заварки дефектов бронзового и чугунного литья. Выпускают диаметром 3 и 4 мм. Сварка и наплавка – в нижнем, горизонтальном и вертикальном положениях постоянным током обратной полярности.

Электроды ОЗБ-3 выпускают диаметром 4 и 5 мм. Сварка в нижнем положении. Применяют для изготовления и восстановления электродов машин контактной сварки методом ручной дуговой наплавки.

Электроды АНЦ/ОЗМ-2, АНЦ/ОЗМ-3 и АНЦ/ОЗМ-4 предназначены для сварки и наплавки изделий из технической чистой меди, содержащей не более 0,01 % кислорода. Выпускают диаметром 4 и 5 мм, сварка в нижнем и наклонном положении.

Выбор диаметра электродного стержня зависит от толщины свариваемого металла, от формы подготовки кромок, от материала стержня. Для средних и больших толщин и для многослойной сварки диаметр электрода можно определить по уравнению

$$d = \text{от } (s/2 - 2) \text{ до } s/2,$$

где  $d$  – диаметр электрода;  $s$  – свариваемая толщина.

Для сварки алюминиевых бронз, в частности легированных цинком, могут применяться электроды, основы покрытия которых составляет криолит. Например, известен состав покрытия: криолит – 60 %; мрамор – 8 %; фтористый натрий – 20 %; плавиковый шпат – 12 %. Другой состав, согласно авторскому свидетельству СССР № 1736683, содержит в покрытии: криолит – 50–70 %; алюминий – 18–25 %; фтористый натрий – 2–10 %; фтористый литий – 2–5 %; фторборат калия – 5–10 %; хлорид натрия – 2–4 %.

## **5.2. Электроды для сварки алюминия и его сплавов**

Алюминий и его сплавы играют важную роль в современной промышленности. Главные достоинства алюминия как конструкционного материала – высокая удельная прочность, хорошая штампуемость, высокая коррозионная стойкость (на воздухе алюминий мгновенно покрывается прочной плёнкой  $Al_2O_3$ , препятствующей его дальнейшему окислению), высокая электропроводность и теплопроводность, его соединения не ядовиты. В частности, эти свойства сделали алюминий чрезвычайно популярным при производстве кухонной посуды, алюминиевой фольги в пищевой промышленности и для упаковки.

Однако прочность чистого алюминия как конструкционного материала невелика, поэтому используют его сплавы. Кроме того, по сравнению с черными металлами алюминий дорогой и у него низкий модуль упругости.

Основная трудность при сварке алюминия и его сплавов – наличие окисной пленки. Температура её плавления 2060 °С, тогда как температура плавления алюминия 660 °С. Плотная тугоплавкая пленка может нарушить стабильность процесса сварки и таким образом повлиять на качество формирования шва, вызвав появление внутренних дефектов в наплавленном металле. Поэтому перед любыми способами сварки необходима тщательная подготовка поверхности алюминия, включающая механическую обработку, травление и промывку.

Для удаления окисной пленки в состав покрытия электродов для ручной дуговой сварки вводят хлористые и фтористые соли щелочных и щелочноземельных металлов. Эти вещества и обеспечивают качественную сварку. Марки наиболее распространенных отечественных электродов для сварки алюминия и его сплавов приведены в табл. 7.

Таблица 7

Электроды для сварки алюминия и его сплавов

Марка электрода	Диаметр, мм	Положение сварки	Основное назначение
ОЗА-1	4,0; 5,0	Нижнее, ограниченно вертикальное	Сварка и наплавка технически чистого алюминия
ОЗА-2	4,0; 5,0	Нижнее, ограниченно вертикальное	Заварка дефектов литья и наплавка изделий из алюминиево-кремнистых сплавов
ОЗАНА-1	3,0; 4,0; 5,0	Нижнее, вертикальное	Сварка и наплавка изделий из технически чистого алюминия
ОЗАНА-2	3,0; 4,0; 5,0	Нижнее, вертикальное	Заварка дефектов литья и наплавка изделий из алюминиево-кремнистых сплавов

Стержень электродов ОЗА-1 выполнен из проволоки Св-А1, стержень ОЗА-2 выполнен из проволоки Св-АК5 (кремния до 5 %). Стержень электродов ОЗАНА-1 изготавливается из сплава АД1 и АВ2Т, а ОЗАНА-2 – из проволоки СвАК3 или СвАК5. Основу покрытий составляют соли – как правило, хлористый натрий, хлористый калий и криолит (гексафтороалюминат натрия,  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ). Наличие криолита в составе покрытия электродов способствует мелкокапельному переносу электродного металла и устойчивому горению дуги. Покрытие замешивают на воде или на растворе поваренной соли.

Вместо криолита могут быть введены другие компоненты. Известно покрытие, авторское свидетельство СССР № 397294, в котором вместо криолита введен кремнефторид калия или кремнефторид натрия при соотношении компонентов: хлористый калий – 45–50 %; хлористый натрий – 20–30 %; кремнефторид – 25–30 %. Вводимый кремнефторид обладает повышенной активностью и обеспечивает получение плотного металла шва и прочного сварного соединения без дополнительной зачистки. Температура плавления кремнефторида калия (натрия) 856 °С, близка к температуре плавления алюминия и его сплавов. Кремнефторид активен по отношению к оксиду алюминия.

Фирма ESAB выпускает следующие электроды для сварки алюминия: ОК 96.10 – технический алюминий; ОК 95.50 – литой сплав типа АЛ-4; ОК 96.20 – сплавы типа АМг, АМц.

Фирма «Линкольн электрик» выпускает следующие электроды для сварки алюминия. AlSi-12 – универсальные электроды для сварки алюминия и его сплавов. Разработаны для сварки деформируемых сплавов, главным образом полусилуминового и силуминового типа, содержащих до 12 % кремния. Сварка данными электродами во всех пространственных положениях, кроме «сверху вниз», обратная полярность (электрод +). Перед сваркой традиционно требуется тщательная подготовка свариваемых кромок. Al Mn – сварка кованных и литых алюминиево-магниевого и алюминиево-марганцевых сплавов. Сварка во всех пространственных положениях, кроме «сверху вниз».

### 5.3. Электроды для сварки никеля и его сплавов

Температура плавления никеля 1455 °С. Характерной особенностью никеля является сохранение пластических свойств при высоких и низких температурах. Никелевые сплавы, содержащие 55 % и более Ni, являются важнейшими конструкционными материалами благодаря их высокой коррозионной стойкости, жаростойкости и жаропрочности, достаточной пластичности. Наибольшее распространение получили сплавы Ni с Cu, Cr, Mo, Al, Fe, Ti, Вe.

Никелевые сплавы условно можно разделить на четыре группы: конструкционные, термоэлектродные, жаростойкие и сплавы с особыми свойствами. К первой группе относятся сплавы на медно-никелевой основе (монель, мельхиор, нейзильбер и др.). Их химический состав определяется ГОСТ 492-73. Конструкционные сплавы отличаются повышенными механическими свойствами и высокой коррозионной стойкостью. Один из наиболее распространенных сплавов этой группы сплав – монель НМЖМц-28-2,5-1,5 имеет структуру типа твердого раствора. Предел прочности этого сплава выше 440 МПа, относительное удлинение больше 25 %, он хорошо обрабатывается в холодном и горячем состоянии, удовлетворительно сваривается.

Ко второй группе относятся сплавы типа хромель, алюмель, копель, манганин, константан. Эти сплавы отличаются большой электродвижущей силой и высоким удельным сопротивлением при малом температурном коэффициенте электросопротивления. Применяются они для изготовления прецизионных приборов, термодпар и компенсационных проводов.

К третьей группе относятся нихромы, отличающиеся высокой жаропрочностью и жаростойкостью и применяющиеся главным образом для изготовления электронагревательных приборов, потенциометрических обмоток, малогабаритных сопротивлений. Химический состав сплавов этой группы определяется ГОСТ 5632-72, ГОСТ 12766-67. Основными компонентами этой группы никелевых сплавов являются хром и железо.

К четвертой группе можно отнести сплавы, обладающие высокой проницаемостью в магнитных полях, например пермаллой, сплавы

с особыми упругими свойствами (инвар) и другие (ГОСТ 10160-75). Пермаллой применяют для изготовления сердечников трансформаторов, деталей реле, магнитопроводов и других устройств.

Сплавы с особыми упругими свойствами – инвар 36Н, ковар 29НК (ГОСТ 10994-76) имеют заданную величину коэффициента теплового расширения и применяются для изготовления деталей, практически не изменяющих свои линейные размеры в интервале температур  $-60...+100$  °С, или, наоборот, для создания термобиметаллов, состоящих из нескольких слоев металла или сплава с различными коэффициентами теплового расширения. Слои термобиметалла прочно соединяются между собой по всей поверхности сопротивления сваркой. При изготовлении термобиметаллических элементов к материалу предъявляются повышенные требования по свариваемости.

Ковар содержит 29 % никеля (Ni), 17 % кобальта (Co) и 54 % железа (Fe). Инвар содержит никеля (Ni) 36 % и железо (Fe) – остальное.

Сварка Ni и его сплавов затруднена вследствие высокой чувствительности к примесям. Наиболее отрицательное влияние на качество сварных швов оказывают С и S. Содержание С ограничивают до 0,15 % (по массе), а в некоторых сплавах – до 0,05 % (по массе). При сварке Ni и его сплавов необходима тщательная зачистка кромок и прилегающих к ним участков на ширине 20–25 мм механическим путем, так как на них образуется налет, содержащий серу, с последующим обезжириванием в ацетоне, уайт-спирите или бензине. Химическое травление, как правило, не применяется, однако может быть рекомендовано при наличии пленки окислов на поверхности металла.

Для ручной дуговой сварки Ni и его сплавов применяют электроды с качественными покрытиями. Наиболее качественные швы обеспечивают электроды с покрытием «Прогресс-50», которые применяют для сварки никеля марок Н-1, НП-1, НП-2. Состав покрытия: рутил ( $TiO_2$ ) – 51 %; плавиковый шпат ( $CaF_2$ ) – 20 %; хлористый натрий – 6 %; марганец – 8 %; титан – 8 %; алюминий – 6 %; жидкое стекло в качестве связующего – 25–30 %. Марганец, титан и алюминий вводят в виде порошков.

Электроды с покрытием ЭНХД-10 предназначены для сварки никелевокремнистых сплавов, с покрытием ЭНХМ-100 – для

нихрома и никелевомолибденовых сплавов. Состав покрытия электродов ЭНХД-10: рутил – 10 %; плавиковый шпат – 40 %; мрамор – 29 %; ферросилиций – 4%; кремний – 10 %; жидкое стекло в качестве связующего – 30 %.

Для сварки сплавов типа ХН80ТБЮ, ХН80ТБЮА, ХН70ВМТЮ и ХН75МВТЮ используют электроды с покрытием типа ИМЕТ и ВИ-2-6. Состав покрытия электродов ИМЕТ-10: рутил – 8,3 %; плавиковый шпат – 18,3 %; хлористый натрий – 16 %; ферромарганец – 2,5 %; хром – 33 %; оксид алюминия – 4,2 %; алюминат натрия в качестве связующего – 10–12 %. Состав покрытия электродов ВИ-2-6: плавиковый шпат – 42,5 %; мрамор – 40,5 %; ферромарганец – 13,2 %; молибден – 3,8 %; жидкое стекло в качестве связующего – 30 %.

Обычно диаметр электродов для сварки никеля и его сплавов составляет 3–5 мм. Длина стержня не превышает 300 мм из-за высокого сопротивления никеля.

Для сварки коррозионно-стойких и жаростойких никелевых сплавов могут быть применены следующие электроды (табл. 8).

Таблица 8

Основные характеристики электродов для сварки коррозионно-стойких и жаростойких никелевых сплавов

Марка электрода	Тип наплавленного металла	Механические свойства металла шва		
		$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$a_{ц}$ , Дж/см <sup>2</sup>
ОЗЛ-37-2	03Х23Н25М3Д3Г2Б	615	35	155
ОЗЛ-17У	03Х23Н27М3Д3Г2Б	585	35	180
АНВ-28	04Х23Н27М4Д3Г2Ф	550	25	100
ОЗЛ-21	Э-02Х20Н60М15В3	810	28	95
ОЗЛ-23	02Н70М29	785	18	60
ОЗЛ-25Б	Э-10Х20Н70Г2М2Б2В	674	38	140
ОЗЛ-25	Э-10Х20Н70Г2М2В2	595	22	–
ОЗЛ-35	10Х27Н70Г2ЮМ2	665	32	135
ОЗЛ-30	06Х14Н65М15В4Г2	750	38	50
ЦТ-28	Э-08Х14Н65М15В4Г2	730	38	145

Электроды ОЗЛ-23 предназначены для сварки оборудования из коррозионно-стойких никель-молибденовых сплавов типа Н70МФ

(ЭП 496), 00Н70М27Ф (ЭП 814), 000Н70М28РР, 000Н70М28Р и для сварки коррозионно-стойкого слоя биметалла с плакировкой из сплавов этого типа. Металл сварных швов характеризуется высокой коррозионной стойкостью в некоторых наиболее агрессивных средах, например в кипящих растворах соляной кислоты.

Электроды ОЗЛ-25Б предназначены для сварки изделий коррозионно-стойких жаростойких сплавов типа ХН78Т (ЭИ 435). Эти универсальные электроды характеризуются сочетанием высоких температур (от  $-196$  до  $900$  °С) и его специальных свойств. Сварка во всех пространственных положениях, кроме «сверху вниз», на постоянном токе обратной полярности. Коррозионная стойкость металла шва находится на уровне основного металла. Кроме сварки никелевых сплавов эти электроды целесообразно использовать для сварки разнородных сталей, что связано с уменьшением диффузионных прослоек по линии сплавления. Большое количество никеля в электродном стержне делает возможным применение данных электродов для сварки чугуна. У электродов высокий коэффициент наплавки —  $14 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$ .

Наибольшую жаростойкость сварных соединений обеспечивают электроды ОЗЛ-35. Эти электроды предназначены для сварки жаростойкого никельхромоалюминиевого сплава ХН70Ю (ЭИ 652), а также сплава ХН45Ю (ЭП 747) и других на никелевой основе, работающих при температурах до  $1200$  °С. Возможна сварка облицовочных слоев швов, сваренных электродами других марок. Сварка во всех пространственных положениях шва постоянным током обратной полярности. Покрытие основное. Коэффициент наплавки также высокий,  $13 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$ .

Электроды ОЗЛ-30 обладают более высокими сварочно-технологическими свойствами, обеспечивают металл шва, аналогичный по физико-химическим свойствам получаемому при применении электродов ЦТ-28. Кроме сварки сплавов на никелевой основе типа ХН78Т, ХН70ВМЮТ и им подобных, работающих при температурах до  $570$  °С, могут применяться для сварки высоколегированных коррозионно-стойких сталей. Вид покрытия рутилово-основной. Сварка во всех положениях, кроме вертикального «сверху вниз» на постоянном токе обратной полярности (на электроде +). Коэффициент наплавки высокий,  $13 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$ .

Процесс сварки никеля и его сплавов ведут на постоянном токе обратной полярности, при этом значение тока назначают пониженным по сравнению с токами, применяемыми при сварке стали. Скорость сварки также понижена на 15 %. Рекомендуется вести сварку в нижнем положении короткой дугой для уменьшения угара стабилизирующих и раскисляющих элементов, содержащихся в электродной проволоке. При сварке производят продольные небольшие колебания конца электрода, что способствует газоудалению и получению более плотных швов, чем при поперечных колебаниях. Электрод держат примерно перпендикулярно плоскости шва с наклоном не более 15° в сторону свариваемых кромок.

#### **5.4. Электроды для сварки чугуна**

Чугун – это сплав железа с углеродом при содержании углерода свыше 2 %. Содержание серы и фосфора в чугуне также больше, чем в стали. Это сравнительно дешевый, широко распространенный конструкционный материал.

Углерод в чугуне находится либо в химически связанном состоянии, либо в свободном состоянии, т. е. в виде графита. Структура чугуна зависит от количества углерода, находящегося в химически связанном состоянии.

Чугун хорошо обрабатывается резанием и обладает отличными литейными свойствами. Однако чугун относится к трудносвариваемым металлам. При сварке чугуна возникает целый ряд трудностей, обусловленных его химическим составом, структурой и механическими свойствами. Главные из них следующие:

- 1) образование твёрдых закалённых зон, затрудняющих последующую механическую обработку и приводящих к образованию трещин (причиной служит выгорание кремния и быстрое охлаждение);
- 2) интенсивное газообразование в сварочной ванне, которое продолжается и на стадии кристаллизации, может привести к образованию пор в металле шва;
- 3) повышенная жидкотекучесть чугуна затрудняет удержание расплавленного металла от вытекания и формирование шва;

4) наличие кремния способствует образованию на поверхности тугоплавких окислов, приводящих к образованию непрочных;

5) высокие скорости охлаждения металла и шва и зоны термического влияния приводят к отбеливанию чугуна, т. е. к появлению участков с содержанием цементита в различном количестве. Высокая твердость отбеленных участков практически лишает возможности обрабатывать чугуны режущим инструментом.

Чугун можно сваривать дуговой сваркой металлическим или угольным электродом, порошковой проволокой, газовой сваркой и другими способами. Часто способы сварки чугуна классифицируют по состоянию свариваемой детали. В зависимости от температуры предварительного подогрева различают: холодную сварку без предварительного подогрева деталей; сварку с подогревом до температур 450 °С; сварку с подогревом до температур 650 °С.

Холодную сварку применяют для случаев, если сварной шов может быть из цветного металла.

Холодную дуговую сварку чугуна выполняют на обрабатываемых и обработанных поверхностях деталей, когда дефекты литья незначительны или средних размеров, когда они несквозные или сквозные, но небольшой протяженности и, наконец, когда наплавляемый металл не предусмотрен в виде чугуна. При холодной сварке, как было указано выше, свариваемые детали не подвергают предварительному нагреву.

Горячую дуговую сварку чугуна применяют в случаях, когда металлом шва должен быть чугун, по своим свойствам приближающийся к свойствам основного металла детали.

Сварка чугуна без подогрева изделия применяется шире, чем с подогревом. Электроды для холодной сварки и наплавки чугуна без предварительного подогрева дают наплавленный металл в виде стали, сплавов на основе меди, никеля и железоникелевого сплава. Это марки ЦЧ-4, ОЗЧ-2, ОЗЧ-6, ОЗЖН-1, ОЗЧ-3 и др. Иногда целесообразно использовать электроды иного назначения. Так, при ремонте чугунных тюбингов в условиях большой загрязненности и высокой влажности лучше брать марку ОЗЛ-25Б. Первые слои на загрязненных чугунах можно выполнять марками ОЗЛ-27 и ОЗЛ-28. Успешно применяют и марку ОЗБ-2М, предназначенную для сварки бронзы.

Стальные электроды марки ЦЧ-4 (на основе проволоки из низкоуглеродистой стали с карбидообразующим покрытием) применяют при ремонте неотчетственных чугуновых изделий небольших размеров с малым объёмом наплавки, не требующих после сварки механической обработки. Покрытие электродов основное, сварку ими производят короткими валиками длиной 25–35 мм с поваликовым охлаждением на воздухе до температуры не выше 60 °С; для деталей из ковкого и высокопрочного чугунов длина валика может быть увеличена до 80–100 мм. Сварка только в нижнем положении.

Электроды ОЗЧ-2 предназначены для холодной сварки, наплавки и заварки дефектов литья в деталях из серого и ковкого чугуна. Сварка в нижнем и вертикальном положениях шва постоянным током обратной полярности. Покрытие кислое. Сварку производят короткими валиками длиной 30–50 мм с поваликовым охлаждением на воздухе до температуры не выше 60 °С и проковкой, непосредственно после отрыва дуги, наложенного валика легкими ударами молотка. Наплавленный металл – медно-стальной сплав (80 % меди, 20 % стали), представляющий собой механическую смесь меди (основа) и стальных включений. Стальная составляющая наблюдается в виде мелких включений, расположенных по всему сечению, а также крупных полей в районе зоны сплавления с основным металлом. Зажигание дуги лёгкое, горение стабильное, почти без разбрызгивания, шлаки лёгкие, отделяемость шлаковой корки лёгкая.

Электроды с основным покрытием ОЗЧ-6 предназначены для холодной сварки деталей из серого и ковкого чугуна, предпочтительно при ремонте тонкостенных конструктивных элементов. Сварка в нижнем и вертикальном положениях шва постоянным током обратной полярности. Сварку производят короткими валиками длиной 30–50 мм с поваликовым охлаждением на воздухе до температуры не выше 100 °С и проковкой наложенного валика легкими ударами молотка. Структура наплавленного валика представляет механическую смесь меди с железом.

Электроды ОЗЖН-1 с основным покрытием предназначены для холодной сварки и заварки дефектов литья в деталях из серого и высокопрочного чугуна. Сварка в нижнем и вертикальном положении на постоянном токе обратной полярности. Стержень выполнен из

проволоки марки Св-08Н50 по ГОСТ 2246-70. Наплавку производят короткими швами длиной 30–50 мм с послойным охлаждением до температуры 60 °С и проковкой каждого участка шва легкими ударами молотка. При заварке крупных дефектов электроды ОЗЖН-1 используют в сочетании с электродами ОЗЧ-3 или МНЧ-2, которыми выполняют первый и последние слои.

Электроды ОЗЧ-3 предназначены для холодной сварки и заварки дефектов литья в деталях из серого и высокопрочного чугуна. Сварка в нижнем и вертикальном положениях шва постоянным током обратной полярности. Стержень из сплава на основе никеля, покрытие основное. Сварку производят короткими валиками длиной 30–50 мм с поваликовым охлаждением на воздухе до температуры не выше 60 °С и проковкой наложенного валика легкими ударами молотка. Заварку крупных дефектов осуществляют совместно с электродами марки ОЗЖН-1.

Электроды МНЧ-2 предназначены для холодной сварки, наплавки и заварки дефектов литья в деталях из серого, высокопрочного и ковкого чугунов. Сварка первого слоя в соединениях с высокими требованиями по плотности, а также сварка соединений с повышенными требованиями по чистоте поверхности после механической обработки. Сварка в нижнем и вертикальном положениях шва постоянным током обратной полярности. Покрытие электродов специальное, стержень – сплав никеля (60–70 %) и меди (25–30 %). Сварку производят короткими валиками длиной 20–30 мм с поваликовым охлаждением на воздухе до температуры не выше 60 °С и проковкой наложенного валика легкими ударами молотка.

Характеристики электродов ОЗЛ-25Б и ОЗБ-2М были описаны ранее.

Электроды ОЗЛ-27 и ОЗЛ-28 похожи по своим характеристикам. У электродов ОЗЛ-27 несколько большее содержание углерода и марганца в наплавленном металле и, соответственно, больше прочность и меньше пластичность. Они предназначены для сварки углеродистых сталей с трудносвариваемыми легированными сталями (инструментальными, штамповыми), а также наплавки изделий из таких сталей. Возможна сварка и наплавка других разнородных сталей и чугуна. Сварка во всех пространственных положениях шва

переменным током и постоянным током обратной полярности. Покрытие электродов рутилово-основное.

При горячей сварке детали и чугунные отливки нагревают до температуры 300–700 °С (в зависимости от формы детали, дефекта, способа сварки). Горячая сварка дает возможность получить сварной шов по плотности и составу точно таким же, как свариваемые чугунные заготовки. Сварка может производиться с помощью:

- обычных стальных электродов;
- электродов марки ОМЧ-1;
- электродами, имеющими стержень из чугуна марки А или Б.

В качестве обычных стальных электродов при сварке чугуна используют широко используемые марки: АНО-4, АНО-5; УОНИ-13/45 и др.

Электроды ОМЧ-1 применяются для сварки и устранения дефектов в изделиях, изготовленных из серого чугуна. Изготавливают из литых чугунных прутков и покрывают специальным покрытием. Диаметр выпускаемых электродов 3, 4, 5 и 6 мм. Эти электроды пригодны для сварки только в нижнем положении на постоянном токе обратной полярности и переменном токе и обеспечивают получение в наплавленном металле – сварном шве серого чугуна. Устойчивость дуги и формирование шва у электродов ОМЧ-1 удовлетворительные.

На электроды с чугунным стержнем наносят покрытие из углекислого бария и карбокорунда, в качестве связующего используют жидкое стекло.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие металлы относят к цветным?
2. Какие особенности сварки цветных металлов?
3. Какова температура плавления никеля?
4. Какие качества обеспечили никелю широкое распространение в промышленности?
5. Что является основой обмазки электродов для сварки алюминия?
6. Что усложняет сварку чугуна?
7. Почему алюминий находит все более широкое распространение среди конструкционных материалов?

## 6. НЕПЛАВЯЩИЕСЯ ЭЛЕКТРОДЫ

Материал неплавящегося электрода не должен участвовать в формировании состава наплавленного металла или металла шва. Поэтому главной задачей неплавящихся электродов является обеспечение устойчивого горения дуги при их минимальном расходе.

Требованию малого расходования электрода отвечают материалы со следующими свойствами:

- а) с высокой температурой кипения;
- б) с большим теплосодержанием при температуре кипения;
- в) значительной скрытой теплотой испарения;
- г) с относительно малыми потерями в результате химических реакций с окружающей средой.

Указанным требованиям удовлетворяют неплавящиеся электроды, изготовленные из угля, графита, вольфрама, меди, меди со вставкой из тугоплавкого металла – вольфрама, циркония, гафния.

Угольные непокрытые электроды – первое сварочное изобретение, принадлежащее Н.Н. Бенардосу, относится к 1882 году – используются и в настоящее время.

Угольные электроды для дуговой резки и сварки регламентируются по ГОСТ 10720-75. ГОСТ регламентирует изготовление омедненных и неомедненных угольных электродов, применяемых для воздушно-дуговой резки металлов, удаления прибылей и дефектов отливок, удаления прихваток и сварных швов по силе тока до 580 А, для сварки металлов и других работ [5]. В зависимости от назначения и сечения угольных электродов ГОСТ 10720-75 предусматривает изготовление электродов трех марок:

ВДК – воздушно-дуговые круглые;

ВДП – воздушно-дуговые плоские;

СК – сварочные круглые.

Электроды воздушно-дуговые круглые изготавливают с номинальным диаметром 6, 8, 10 и 12 мм при длине 300 + 10 мм. Электроды воздушно-дуговые плоские изготавливают номинальным сечением 12×5 мм и 18×5 мм при длине 350 + 10 мм. Электроды сварочные круглые изготавливают с номинальным диаметром 4, 6, 8, 10, 15 и 18 мм при длине 250 + 10 мм.

Примеры обозначений:

- электрод ВДП 18×5 ГОСТ 10720-75 – электрод воздушно-дуговой плоский шириной 18 мм и высотой 5 мм;
- электрод ВДК 10 ГОСТ 10720-75 – электрод воздушно-дуговой диаметром 10 мм.

Состав для изготовления угольных электродов применяют следующий (в %):

- |                             |       |
|-----------------------------|-------|
| – кокс из грозненской нефти | 38,8; |
| – сажа № 3                  | 15,4; |
| – смола каменноугольная     | 23,0; |
| – электродный бой           | 22,8. |

Технологический процесс изготовления угольных электродов включает следующие операции:

1. Дробление кусковых материалов на дробилках и в шаровых мельницах.
2. Кальцинирование (прокалка при 700–950 °С).
3. Просев на механических виброситах для получения требуемого гранулометрического состава сыпучих материалов.
4. Дозировка по весу.
5. Смешивание взвешенных компонентов в механических мешалках при температуре 80–110 °С.
6. Прессование (формовка или прошивка).
7. Обжиг при температуре нагрева до 1400 °С.
8. Механическая обработка.
9. Приемка (контроль качества).

В некоторых случаях проводят поверхностное омеднение электродов, улучшающее их стойкость при повышенных плотностях тока.

Графитовые электроды изготавливают из угольных посредством дополнительной высокотемпературной обработки – графитизации.

Графитизация осуществляется длительной выдержкой угольных стержней при 25000–26000 °С. Нагрев обеспечивается пропусканием по стержням тока достаточно большой силы.

Эта операция является весьма энергоемкой, и стоимость графитовых электродов в связи с этим значительно выше угольных.

Задача такой обработки сводится к перестройке относительно хаотичного расположения атомов в атмосферном углероде в стро-

гую кристаллическую решетку графита, строение в виде правильных шестиугольников, с постоянными параметрами решетки – расстоянием между атомами в каждом слое и между слоями.

Угольные электроды могут применяться для ручной дуговой сварки меди, преимущественно для малоответственных изделий. Угольные электроды целесообразно использовать при толщине меди до 15 мм. При больших толщинах лучшие результаты получают, применяя графитовые электроды. Сварку выполняют электродами, заточенными на конус (на 1/3 его длины), на постоянном токе прямой полярности. Плотность тока на электроде обычно составляет 200–400 А/см<sup>2</sup>.

Медь толщиной 1–3 мм следует сваривать с отбортовкой без присадочного металла, при большей толщине необходимо применять присадочные прутки. В качестве присадочных прутков при сварке меди угольным электродом рекомендуется применять медь марки М1 и различные сплавы меди, содержащие раскислители (фосфор, кремний, марганец и др.). Наиболее часто в настоящее время применяют присадочные прутки из бронзы Бр. ОФ 9-03 и Бр. КМЦ 3-1 и меди марки М1.

При использовании угольного электрода сварку необходимо вести длинной дугой, причем присадочный материал не погружать в ванну, а держать его под углом приблизительно 36° по отношению к изделию и на расстоянии 5 мм от поверхности расплавленного слоя.

Электрод располагают под углом 75–90° к свариваемому изделию. Углекислый газ, выделяющийся в процессе сварки, недостаточно защищает расплавленный металл от окисления, поэтому применяют присадочный материал с раскислителем – фосфором, а также флюс (94–56 % прокаленной буры, 6–4 % металлического магния). Флюс наносят на смоченную жидким стеклом поверхность прутка или на свариваемые кромки в виде пудры и просушивают на воздухе.

В случае, если толщина свариваемых деталей меди достигает 5 мм, стыковое соединение должно иметь угол среза на кромках до 90°. Непосредственно сварку надо вести на асбестовой (графитовой) основе. Электрод при этом должен иметь угол наклона вперед – 10–20°. Желательна послесварочная проковка по всей длине готового шва.

Соединение из металла толщиной до 5 мм проковывают без подогрева, при большей толщине – с подогревом до 800 °С и последующим быстрым охлаждением. Стыковые швы рекомендуется сваривать в один слой с одной стороны во избежание снижения механических свойств.

Ручная дуговая сварка угольным электродом дугой прямого действия используется также при сварке тонколистовой углеродистой конструкционной стали и при сварке некоторых цветных металлов и сплавов на их основе.

Особенности: постоянный ток, прямая полярность, дополнительная подача присадочной проволоки, дуга стабильная, стержень сгорает медленно, науглероживания не происходит. Применение обратной полярности снижает характеристики дуги и шва (он науглероживается).

Сварка чугуна угольным электродом ведётся постоянным током прямой полярности: для электродов диаметром 8–20 мм используются соответственно токи 280–600 А. Применяют преобразователи ПСМ-1000, выпрямители ВАМ-1601, трансформаторы ТДФ-1601.

Широкое применение вольфрама для изготовления электродов обусловлено его тугоплавкостью (температура плавления 3500 °С; температура кипения 5900 °С) и высокими электропроводностью и теплопроводностью, самой низкой скоростью испарения. Вольфрам – самый тугоплавкий из известных материалов. По температуре плавления уступает лишь углероду, с той поправкой, что углерод не плавится, а возгоняется. Попытки замены вольфрама другим, более дешевым материалом пока не увенчались успехом.

В России неплавящиеся вольфрамовые электроды производят в соответствии с требованиями стандартов и технических условий. Среди них: ГОСТ 23949-80 «Электроды вольфрамовые сварочные неплавящиеся. Технические условия»; ТУ 48-19-27-88 «Вольфрам лантанированный в виде прутков. Технические условия»; ТУ 48-19-221-83 «Прутки из иттрированного вольфрама марки СВИ-1. Технические условия»; ТУ 48-19-527-83 «Электроды вольфрамовые сварочные неплавящиеся марок ЭВЧ и ЭВЛ-2. Технические условия».

Электрод из чистого вольфрама обозначается WP, маркировка зеленым цветом. По ГОСТ 23949-80 обозначается ЭВЧ, далее это

обозначение в скобках. Содержит 99,5 % вольфрама. Вольфрамовые электроды, которые не содержат в своем составе легирующих добавок, обеспечивают хорошую устойчивость дуги при сварке на переменном токе, сбалансированном или не сбалансированном с непрерывной высокочастотной стабилизацией (с осциллятором). Такой электрод применяется в основном для аргонодуговой сварки на переменном синусоидальном токе алюминия, магния и их сплавов, так как они обеспечивают хорошую устойчивость дуги как в аргоновой, так и в гелиевой среде. Из-за ограниченной тепловой нагрузки рабочий конец электрода из чистого вольфрама формируют в виде шарика. Недостатки: сложности при возбуждении дуги; загрязнение сварочной ванны вольфрамовыми включениями.

Электроды, содержащие в своем составе 2 % оксида тория, обозначаются WT-20 (ЭВТ), маркировка красным. Их применяют достаточно часто, так как они обладают рядом положительных качеств. Тем не менее торий – радиоактивный материал, таким образом, пары и пыль, образующиеся при заточке электрода, могут влиять на здоровье сварщика и безопасность окружающей среды.

Эти электроды предпочтительны для соединения заготовок из нержавеющей стали, на постоянном токе. Однако есть у этих вольфрамовых электродов и ряд недостатков. При их использовании для сварки в закрытых помещениях и при заточке следует оборудовать рабочее место вытяжной вентиляцией, так как торий – это радиоактивный металл, пары и пыль которого могут оказать негативное влияние на здоровье человека. Кроме того, при сварке такими электродами, осуществляемой на переменном токе, дуга может скакать по выступающим поверхностям, что приводит к ухудшению качества формируемого соединения. Сварка осуществляется постоянным током. Такой вид электрода используют для сварки низколегированных, углеродистых, нержавеющей сталей.

Торированные электроды хорошо сохраняют свою форму при больших сварочных токах даже в тех случаях, когда чисто вольфрамовый электрод начинает плавиться с образованием на конце сферической капли.

Сплав вольфрама с 2 % оксида церия обозначается WC-20, маркируется серым. Церий – это самый распространенный нерадиоак-

тивный редкоземельный элемент; он улучшает эмиссию электронов. Соответственно, облегчается зажигание дуги и увеличивается допустимый сварочный ток. По сравнению с чисто вольфрамовым электродом цериевый электрод обеспечивает большую устойчивость дуги даже при малых значениях тока.

Электроды WC-20 – универсальные, ими можно вести сварку на переменном токе и на постоянном прямой полярности. Электроды применяются при орбитальной сварке труб, сварке трубопроводов и тонколистовой стали практически всех видов. При сварке этими электродами с большими значениями тока происходит концентрация оксида церия в раскаленном конце электрода. Это является недостатком цериевых электродов.

Электроды с оксидом лантана обозначают WL-15 (ЭВЛ), содержат оксид лантана в количестве 1,5 %, маркируются золотым цветом; WL-20 содержат оксид лантана в количестве 2 %, маркируются синим цветом.

Электроды из сплава вольфрама с оксидом лантана обеспечивают легкое первоначальное зажигание дуги, низкую склонность к прожогам, устойчивость дуги и легкое повторное зажигание дуги. Добавка 1,5 % оксида лантана увеличивает максимальный ток, несущая способность электрода примерно на 50 % больше для данного типоразмера при сварке на переменном токе, чем чисто вольфрамового. По сравнению с цериевыми и ториевыми лантановые электроды имеют меньший износ рабочего конца электрода. Лантановые электроды более долговечны и меньше загрязняют вольфрамом сварной шов. Оксид лантана равномерно распределен по длине электрода, что позволяет длительное время сохранять при сварке первоначальную заточку электрода. Это серьезное преимущество при сварке на постоянном (прямой полярности) или переменном токе от улучшенных источников сварочного тока, сталей и нержавеющей сталей. Применяется для плазменной сварки, резки, напыления.

Вольфрамовые электроды с добавками оксида иттрия обозначаются WY-20 (ЭВИ), маркируются темно-синим цветом. Они наиболее стойкие из используемых в настоящее время неплавящихся электродов. Используется для сварки особо ответственных соединений на постоянном токе прямой полярности, содержание окисной добавки

– 1,8–2,2 %. Вольфрамовые электроды с добавками иттрия обеспечивают стабильность катодного пятна на конце электрода, вследствие чего повышается устойчивость дуги в широком диапазоне рабочих токов. Такие электроды применяют для сварки углеродистой, низколегированной, нержавеющей стали, а также меди, титана.

Вольфрамовые электроды с добавками оксида циркония обозначаются WZ-8, маркировка белым цветом. Процесс сварки происходит на переменном токе. Электроды с добавлением оксида циркония предпочтительны для сварки на переменном токе, когда не допускается даже минимальное загрязнение сварочной ванны. Электроды дают чрезвычайно стабильную дугу. Допустимая токовая нагрузка на электрод несколько выше, чем на цериевые, лантановые и ториевые электроды. Рабочий конец электрода при сварке на переменном токе обрабатывается в форме сферы. Такой вид электрода применяют для сварки алюминия, магния.

Пример условного обозначения электрода марки ЭВЛ диаметром 3,0 мм длиной 200 мм: Электрод вольфрамовый ЭВЛ-3-200 – ГОСТ 23949-80.

Перечисленная выше цветная маркировка вольфрамовых электродов совпадает с требованиями международных стандартов DIN EN 26848 (рис. 8). Цветную маркировку рекомендуется выполнять нитролаком НЦ-62.



Рис. 8. Вольфрамовые электроды

Электроды диаметром 3,0 мм и более допускается маркировать снятием фасок  $1 \text{ мм} \cdot 45^\circ$ . Маркировка должна быть нанесена на одном из концов электрода. Маркировка может быть нанесена на торец в виде полосы или точки на поверхности у торца на 5–10 мм.

Чтобы облегчить манипуляции электродом, сплошной вольфрамовый стержень в некоторых случаях заменяют гибким тросиком, сплетенным из большого числа проволок. Вольфрамовый электрод ввиду его окисления используется только при сварке с защитой области дуги инертными газами. Вольфрамовые электроды обеспечивают максимальную токовую нагрузку по сравнению с другими типами вольфрамовых электродов. Они рекомендуются для сварки как на переменном, так и на постоянном токе.

Эрозия вольфрамовых электродов в большой мере зависит от рода и значения сварочного тока, марки электрода, эффективности его охлаждения и условий газовой защиты. Если охлаждением электрода при данном значении сварочного тока поддерживается температура, при которой термоэмиссия электронов достаточна для обеспечения потребной плотности тока, то эрозия в этом случае минимальная. При переохлаждении электрода увеличиваются доля ионного тока между электродом и плазмой столба, тепловой поток в тело электрода, а вместе с ним и эрозия. При аргонодуговой сварке на токах до 500 А удельный расход вольфрама колеблется в зависимости от технологических условий в пределах  $1 \cdot 10^{-8} - 8 \cdot 10^{-6} \text{ г}/(\text{А} \cdot \text{с})$ . Поэтому вопрос о выборе оптимального теплового режима вольфрамового электрода является весьма важным.

Боковая поверхность и конец электрода при правильном выборе параметров режима сварки и размеров электрода должны блестеть, матовая поверхность означает, что тепловая нагрузка на электрод превышает рекомендуемую. Если поверхность электрода после сварки приобретает синий, черный цвет или имеет зеленый налет, это означает, что расход аргона недостаточен или время продувки аргона после отключения дуги мало.

При длительной работе вольфрамового электрода на его рабочей поверхности у торца образуются наросты окислов вольфрама, так называемые коронки, которые могут приводить к произвольному перемещению катодного пятна и блужданию дуги по поверхности свароч-

ной ванны. Вероятность образования «коронки» уменьшается при интенсивном охлаждении электрода и улучшении газовой защиты.

Важно перед применением обеспечить правильную заточку вольфрамовых электродов. От формы заточки неплавящегося электрода зависят такие важные параметры, как давление сварочной дуги и распределение энергии, которую она передает металлу соединяемых деталей. Именно поэтому от того, как заточен электрод, зависят размеры зоны проплавления соединяемого металла и, соответственно, глубина, а также ширина сварного шва.

Заточка вольфрамовых электродов должна производиться твердыми дисками с мелким зерном, чтобы избежать образования заусенцев и бороздок на торце электрода. Круг, на котором затачиваются вольфрамовые электроды, не должен применяться для других материалов, чтобы исключить загрязнение. Вольфрамовые электроды используются с заточкой под углом 20–90°.

Диаметр притупления вольфрамового электрода (катода) и угол заточки влияют на проплавляющую способность дуги. При уменьшении диаметра притупления повышается концентрация теплового потока, растет давление дуги и плотность тока. Острая заточка электрода исключает блуждание катодного пятна по поверхности электрода. Глубина проплавления монотонно увеличивается при уменьшении диаметра притупления электрода.

Изменение угла заточки приводит к изменению формы и размера столба дуги. При углах заточки 15–75° столб имеет коническую форму, при больших углах форма столба дуги приближается к цилиндрической, а пятно нагрева сокращается.

Несимметричная заточка и наличие рисок может вызывать неконтролируемое блуждание сварочной дуги. Если слишком острый угол заточки, то вольфрамовый электрод начинает быстро плавиться.

По распространенности в земной коре вольфрам занимает 28-е место. Вольфрам входит в состав 22 минералов, однако промышленное значение имеют только минералы группы вольфрамита и шеелит (табл. 9).

Подавляющее большинство месторождений вольфрама представлено комплексными рудами. Богатые вольфрамовые руды обычно имеют в своем составе 0,2–2 % вольфрама. Поэтому сначала

производится обогащение вольфрамовой руды. Оно производится с помощью гравитации, флотации, магнитной или электростатической сепарации. В результате обогащения получают вольфрамовый концентрат, содержащий 55–65 % ангидрида (трехоксида) вольфрама  $WO_3$ . В вольфрамовых концентратах контролируется содержание примесей – фосфора, серы, мышьяка, олова, меди, сурьмы и висмута.

Таблица 9

Важнейшие минералы, содержащие вольфрам

Минерал	Состав (формула)	Содержание $WO_3$ , %	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Ферберит	$FeWO_4$	76,3	7,5
Вольфрамит	$(Fe, Mn) WO_4$	76,5	7,1–7,5
Гюбнерит	$MnWO_4$	76,6	7,1
Шеелит	$CaWO_4$	80,6	5,8–6,2

Из концентрата получают трехокись (ангидрид) вольфрама  $WO_3$ , который служит исходным сырьем для производства металлического вольфрама или его карбида. Для этого необходимо выполнить ряд действий, таких, как разложение концентратов, выщелачивание сплава или спека, получение технической вольфрамовой кислоты и др. В итоге должен получиться продукт, содержащий 99,90–99,95 %  $WO_3$ .

Затем получают чистый вольфрам в виде порошка из ангидрида вольфрама  $WO_3$ . Для этого проводят процесс восстановления ангидрида водородом или углеродом. Восстановление углеродом применяется реже, так как при данном процессе  $WO_3$  насыщается карбидами, что делает металл более хрупким и ухудшает обрабатываемость. При получении вольфрамового порошка используют специальные методы, позволяющие контролировать его химический состав, размер и форму зерен, гранулометрический состав. Например, быстрое нарастание температуры, малая скорость подачи водорода способствуют увеличению размера частиц порошка.

Получение компактного вольфрама. Компактный вольфрам, как правило, в виде штабиков или слитков является заготовкой для производства полуфабрикатов, таких, как проволока, прутки, лента и так далее.

Существуют два способа получения компактного вольфрама. Первый заключается в применении методов порошковой металлургии. Второй – с помощью плавки в электрических дуговых печах с расходуемым электродом. Методы порошковой металлургии являются наиболее распространенными, так как позволяют более равномерно распределять присадки, которые придают вольфраму специальные свойства (жаропрочность, эмиссионные свойства и другие).

Процесс получения компактного вольфрама методом порошковой металлургии состоит из нескольких стадий:

- прессование штабиков из металлического порошка;
- низкотемпературное (предварительное) спекание заготовок;
- спекание (сварка) заготовок;
- обработка заготовок с целью получения полуфабрикатов – вольфрамовой проволоки, ленты, вольфрамовых прутков; обычно заготовки обрабатывают под давлением (ковкой) или подвергают механической обработке резанием (например шлифование, полирование).

Вольфрамовые прутки – один из самых распространенных видов продукции из тугоплавкого металла вольфрам. Исходным материалом для производства прутков является штабик.

Для получения вольфрамовых прутков штабик подвергают ковке на ротационной ковочной машине. Ковка осуществляется в нагретом состоянии, так как при комнатной температуре вольфрам очень хрупкий. Можно выделить несколько этаповковки. На каждом следующем этапе получают прутки меньшего диаметра, чем на предыдущем.

При первой ковке можно получить вольфрамовые прутки диаметром до 7 мм (при условии, что штабик имеет длину стороны 10–15 см). Ковку осуществляют при температуре заготовки 1450–1500 °С. В качестве материала нагревателя обычно используется молибден. После второйковки получают прутки диаметром до 4,5 мм. Ее производят при температуре штабика 1300–1250 °С. При дальнейшей ковке получают вольфрамовые прутки диаметром до 2,75 мм. Стоит отметить, что вольфрамовые прутки марок ВТ, ВЛ и ВИ получают при более высокой температуре, чем прутки марок ВА и ВЧ.

Если в качестве исходной заготовки используют слитки из вольфрама, которые получают путем плавки, то горячую ковку не осуществляют. Это связано с тем, что данные слитки имеют грубую крупнокристаллическую структуру, и их горячая ковка может привести к образованию трещин и разрушению.

В таком случае вольфрамовые слитки подвергают двойному горячему прессованию (степень деформации около 90 %). Первое прессование производится при температуре 1800–1900 °С, второе – 1350–1500 °С. Затем заготовки подвергают горячей ковке для получения прутков из вольфрама.

Учитывая, что вольфрамовые электроды хрупкие, важное внимание уделяют их упаковке. Электроды одной марки, одного диаметра укладывают в коробки из картона с ложементами из пенопласта, гофрированной или прессованной плотной бумаги (рис. 9). Соответственно, на каждую коробку с электродами наклеивают ярлык, который содержит следующую информацию: наименование предприятия-изготовителя или его товарный знак; наименование продукта; условное обозначение продукта; количество, шт.; номер партии; дата выпуска; вид маркировки; штамп технического контроля.



Рис. 9. Упаковка электродов

В свою очередь коробки с электродами упаковывают в дощатые ящики, выложенные внутри упаковочной водонепроницаемой бу-

магой. Оставшийся свободный объем ящика плотно заполняют упаковочной бумагой или ватой. В таком виде электроды отправляют потребителю.

Вольфрамовые электроды применяют для сварки в среде защитного газа. В качестве защитных газов применяют аргон газообразный чистый марки А или Б по ГОСТ 10157-62, реже гелий сорта ВЧ по МРТУ 51-04-23-64 или смеси этих газов. Гелий используется реже по причине высокой стоимости и большего расхода (из-за меньшей плотности). Однако при одном и том же значении тока дуга в гелии выделяет в 1,5–2 раза больше энергии, чем в аргоне. Это способствует более глубокому проплавлению металла и значительно повышает скорость сварки. Поэтому при сварке тугоплавких металлов отдают предпочтение гелию. Однако горение дуги в среде гелия происходит при более высоком напряжении (в 1,4–1,7 раза выше, чем в аргоне). Из-за этого требуется применение для питания сварочной дуги специализированных источников с повышенным напряжением холостого хода. Смесь аргона и гелия (оптимальный состав содержит 35–40 % аргона и 60–65 % гелия) имеет преимущества обоих газов: аргон обеспечивает стабильность дуги, гелий – высокую степень проплавления.

Для сварки вольфрамовым электродом наряду с инертными газами могут быть использованы и другие газы, например азот и водород, их смеси с аргонem.

Международное обозначение указанного способа TIG. Расшифровывается как Tungsten (вольфрам) Inert (инертный) Gas (газ). Способом TIG можно соединять больше металлов, чем любым другим способом сварки. Качественно свариваются коррозионноустойчивая сталь, алюминий, титан, магний, медь, бронза и др.

Для сварки большинства металлов применяют постоянный ток прямой полярности (на электроде минус). При сварке постоянным током прямой полярности обеспечиваются лучшие условия для термоэлектронной эмиссии с электрода, выше его стойкость и допускаемая сила тока. Сварочная дуга на прямой полярности легко возбуждается и горит при напряжении 10–15 В в широком диапазоне плотности тока.

При сварке постоянным током обратной полярности возрастает напряжение дуги, уменьшается устойчивость горения, резко снижается стойкость электрода и повышается его нагрев. Но дуга обратной полярности обладает полезным технологическим свойством: при ее воздействии на поверхность свариваемого металла удаляются оксиды с поверхности. Процесс удаления поверхностных оксидов имеет название «катодное распыление» (катодная очистка). Особенно важно это при сварке металлов, поверхность которых покрыта плотной и прочной пленкой оксидов. Поэтому сварку алюминия и его сплавов, магния, медных сплавов со значительным содержанием алюминия (например, алюминиевая бронза) выполняют переменным током.

Сила сварочного тока выбирается в соответствии с диаметром электрода и зависит от рода тока (табл. 10). Здесь представлены ориентировочные значения силы тока при использовании аргона в качестве защитного газа.

Таблица 10

Сила тока при сварке вольфрамовыми электродами

Диаметр электрода, мм	Постоянный ток прямой полярности, А	Переменный ток, А
1	10–70	10–15
1,6	40–130	30–90
2	65–160	50–100
3	140–180	100–160
4	250–340	140–220
5	300–400	200–280
6	350–450	250–300

Если выбирать ток по нижней границе, то при слишком малой силе тока дуга может блуждать, и следует увеличить силу тока, при условии, что электрод заточен правильно.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие легирующие добавки вводят в вольфрам?
2. Какова температура плавления вольфрама?
3. Какова температура кипения вольфрама?
4. Какой должен быть цвет поверхности вольфрамового электрода после сварки?
5. Какие особенности заточки вольфрамового электрода?
6. С какой целью поверхность угольного электрода покрывают слоем меди?
7. В чем опасность применения вольфрамовых электродов с добавками тория?

## 7. ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ НАПЛАВКИ

В группу электродов для наплавки входят электроды, предназначенные для ручной дуговой наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами (кроме электродов для наплавки слоев из цветных металлов) [6]. Электроды изготавливают в соответствии с ГОСТ 9466-75 и ГОСТ 10051-75. Для наплавочных работ в некоторых случаях также используют сварочные электроды, например, электроды, предназначенные для сварки высоколегированных коррозионно-стойких, жаростойких и жаропрочных сталей.

Согласно ГОСТ 10051-75 электроды для наплавки поверхностных слоев по химическому составу наплавленного металла и твердости при нормальной температуре классифицированы на 44 типа (например, электроды типа Э-16Г2ХМ, Э-110Х14В13Ф2, Э-13Х-16Н8М5С5Г46). Наплавленный металл многих электродов регламентируется техническими условиями предприятий-изготовителей.

В зависимости от принятой системы легирования и условий работы получаемого наплавленного металла электроды для наплавки условно разделены на 6 групп:

1. Электроды, обеспечивающие получение низкоуглеродистого низколегированного наплавленного металла с высокой стойкостью в условиях трения металла о металл и ударных нагрузок (по назначению к этой группе относятся некоторые марки электродов 3-й группы).
2. Электроды, обеспечивающие получение среднеуглеродистого низколегированного наплавленного металла с высокой стойкостью в условиях трения металла о металл и ударных нагрузок при нормальной и повышенной температурах (600–650 °С).
3. Электроды, обеспечивающие получение углеродистого, легированного (или высоколегированного) наплавленного металла с высокой стойкостью в условиях абразивного изнашивания и ударных нагрузок.
4. Электроды, обеспечивающие получение углеродистого высоколегированного наплавленного металла с высокой стойкостью в условиях больших давлений и высоких температур (650–850 °С).

5. Электроды, обеспечивающие получение высоколегированного аустенитного наплавленного металла с высокой стойкостью в условиях коррозионно-эрозионного изнашивания и трения металла о металл при повышенных температурах (570–600 °С).
6. Электроды, обеспечивающие получение дисперсно-упрочненного высоколегированного наплавленного металла с высокой стойкостью в тяжелых температурно-деформационных условиях (950–1100 °С).

К первой группе относятся электроды ОЗН-300М, ОЗН-400М, ОМГ-Н, ЦНИИН-4. Покрытие электродов данной группы основное. Сварка в нижнем положении.

Ко второй группе относятся электроды ОЗШ-2, ОЗШ-3, ОЗШ-7, ЭН-60М, ОЗИ-3. Покрытие основное.

Третья группа – электроды ОЗН-6, ОЗН-7, ОЗН-7М, ВСН-6, ЭНУ-2, Т-590, Т-620. Характерным является содержание в указанных электродах углерода в стержнях свыше 0,7 %, так как условия эксплуатации требуют высокой твердости покрытия.

Четвертая группа – электроды ОЗИ-5, ОЗИ-6. Наплавка в нижнем положении постоянным током обратной полярности, покрытие специальное. В наплавленном металле электрода ОЗИ-5 около 9 % молибдена и 19 % кобальта. В наплавленном металле электрода ОЗИ-6 около 7,5 % молибдена, 4 % хрома, 2 % вольфрама и углерода свыше 1 %.

К пятой группе относятся электроды ЦН-6Л, ЦН-12М. Электроды ЦН-6Л предназначены для наплавки уплотнительных поверхностей деталей арматуры котлов, работающих при температуре до 570 °С и давлении до 78 МПа. Покрытие электродов основное. Стержень содержит 16 % хрома, 5 % кремния и 8 % никеля. Наплавка в нижнем положении постоянным током обратной полярности.

Температура, при которой эксплуатируются наплавленные слои, наносимые электродом ЦН-12М, – до 700 °С. Слой, наплаваемый данным электродом, кроме хрома, никеля, кремния содержит 6 % молибдена и 4 % марганца. Поэтому наплавленный слой еще устойчив к задиранью. Наплавка в нижнем положении постоянным током обратной полярности.

К шестой группе относят электроды ОЗШ-6 и ОЗШ-8. Электроды ОЗШ-6 предназначены для наплавки бойков радиально-ковочных машин, штампов холодной и горячей штамповки, ножей горячей резки металлов, быстроизнашивающихся деталей металлургического, станочного и другого оборудования, работающих в тяжелых температурно-деформационных условиях (до 950 °С). Наплавку деталей из закаливающих сталей производят с предварительным и сопутствующим подогревом до температуры 300–450 °С (нижнее значение – для штамповых сталей типа 5ХНМ). Наплавку производят вразброс отдельными участками с минимальным тепловложением. Наплавка в нижнем положении постоянным током обратной полярности. Покрытие основное. Наплавленный слой содержит 33 % хрома, 10 % никеля и молибден 2,5 %.

Электроды ОЗШ-8 применяют для наплавки супертяжелонагруженной кузнечно-штамповой оснастки горячего деформирования и деталей металлургического оборудования (преимущественно сложной геометрии и большой жесткости), работающих при температуре до 1100 °С. Наплавленный слой по содержанию легирующих компонентов почти такой же, как у электродов ОЗШ-6, несколько большее содержание молибдена. Наплавка в нижнем и наклонном положении постоянным током обратной полярности.

### **Контрольные вопросы**

1. Можно ли для наплавки специальных слоев использовать обычные сварочные электроды?
2. На какие группы, в зависимости от принятой системы легирования и условий работы получаемого наплавленного металла, классифицируют электроды для наплавки?
3. Какое покрытие преимущественно наносят на электроды, предназначенные для наплавки?
4. Какой компонент обеспечивает высокую твердость наплавленного покрытия?

## Библиографический список

1. Тархов, Н.А. Производство металлических электродов / Н.А. Тархов, З.А. Сидлин, А.Д. Рахманов. – М. : Высшая школа, 1986. – 196 с.
2. Технологические процессы и оборудование электродного производства : сб. науч. тр. / Гос. НИИ конструкц. материалов на основе графита, Гос. н.-и. и проект.-конструкт. ин-т электрод. пром-сти. – М. : НИИграфит, 1989. – 133 с.
3. Власов, А.Ф. Электроды с экзотермической смесью в покрытии для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей : дис. ... канд. техн. наук / А.Ф. Власов. – Краматорск, 1984. – 237 с.
4. Чебац, В.А. Сварочные работы : учеб. пособие / В.А. Чебац. – 3-е изд. перераб. – Ростов н/Д : Феникс, 2006. – 412 с.
5. Колганов, Л.А. Сварочное производство : учебное пособие / Л.А. Колганов. – Ростов н/Д : Феникс, 2002. – 512 с.
6. Щекин, В.А. Технологические основы сварки плавлением : учеб. пособие для вузов / В.А. Щекин. – 2-е изд., перераб. – Ростов н/Д : Феникс, 2009. – 345 с.
7. Мейстер, Р.А. Нестандартные источники питания для сварки : учеб. пособие / Р.А. Мейстер. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2004. – 96 с.