

**Г. Л. ПЕТРОВ**

# **Сварочные материалы**

*Допущено Министерством высшего и среднего  
специального образования РСФСР  
в качестве учебного пособия  
для высших технических учебных заведений*

ИЗДАТЕЛЬСТВО „МАШИНОСТРОЕНИЕ“  
ЛЕНИНГРАД 1972



6П4.3

ПЗО

УДК 621. 791. 04

**Сварочные материалы.** Учебное пособие для вузов.  
Петров Г. Л. Л., „Машиностроение“, 1972, 280 стр.  
Табл. 52. Илл. 99. Библ. 85 назв.

В пособии рассматриваются общие вопросы влияния применяемых сварочных материалов на свойства сварных соединений, общие вопросы металлургических процессов при сварке, влияющих на изменение свойств этих материалов, а также некоторые типовые решения по применению металлических и неметаллических сварочных материалов. Приводятся некоторые положения по расчетным методам, применение которых может сократить объем экспериментальных исследований при разработке новых материалов.

Пособие может быть использовано инженерно-техническими работниками научно-исследовательских институтов и предприятий.

3—12—6

71—72

Рецензенты:

канд. техн. наук Р. А. КОЗЛОВ;  
кафедра сварки судовых конструкций ЛКИ

Редактор д-р техн. наук В. Л. РУССО

**Георгий Львович ПЕТРОВ**

**СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Редактор издательства Л. Р. Кухтевич  
Переплет художника Л. М. Жданова  
Технический редактор Т. П. Малашкина  
Корректор Э. С. Романова

Ленинградское отделение  
издательства «МАШИНОСТРОЕНИЕ»  
191065, Ленинград, ул. Дзержинского, 10

Сдано в производство 12/1 1972 г.  
Подписано к печати 24/V 1972 г. М-12104  
Формат бумаги 60×90 1/16  
Бумага типографская № 2  
Печ. л. 17,5 Уч.-изд. л. 18,3  
Тираж 35 000 экз. Зак. № 1454  
Цена 85 к.

Ленинградская типография № 6  
Главполиграфпрома Комитета по печати  
при Совете Министров СССР  
193144, Ленинград, ул. Моисеенко, 10

## ВВЕДЕНИЕ

Сварка является одним из ведущих технологических процессов изготовления металлических конструкций. В 1969 г. в СССР около  $\frac{1}{3}$  выпущенного металла пошло на изготовление разнообразных конструкций, выполняемых с применением сварки. Для изготовления сварных конструкций, выполнения различных наплавочных работ также применяется большое количество сварочных материалов.

Сварочные материалы можно классифицировать так.

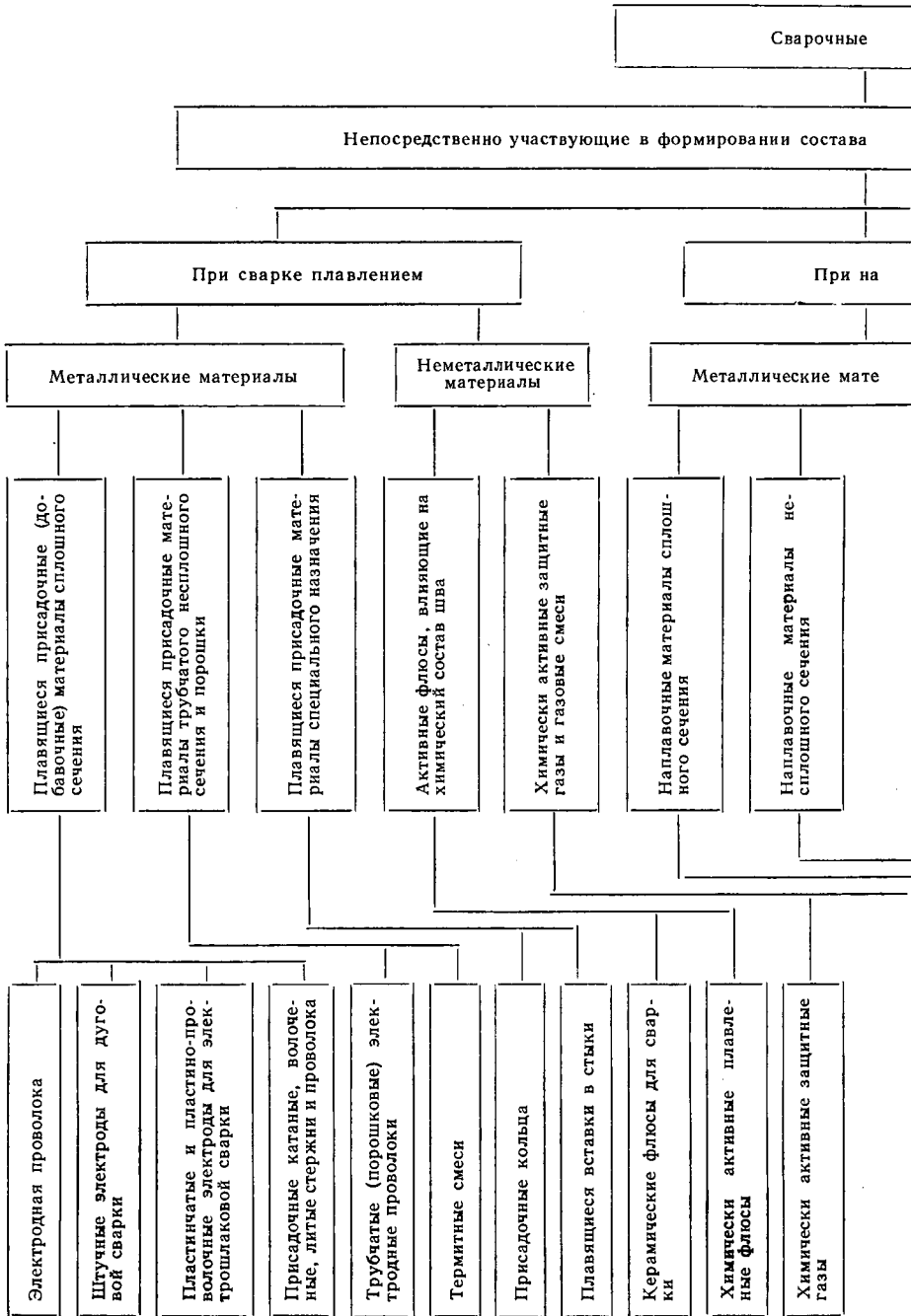
1. Непосредственно участвующие в образовании сварного соединения, в частности металла шва; к ним относятся штучные плавящиеся электроды при ручной дуговой сварке, электродные проволоки и комбинированные электроды при дуговой сварке в защитных газах, под флюсом и при электрошлаковой сварке, присадочные материалы при различных способах сварки плавлением; в несколько меньшей степени участвуют в формировании состава швов флюсы и активные газы.

2. Непосредственно не участвующие в образовании металла шва; это неплавящиеся электроды — угольные, графитовые, вольфрамовые; инертные защитные газы — аргон, гелий и пр.

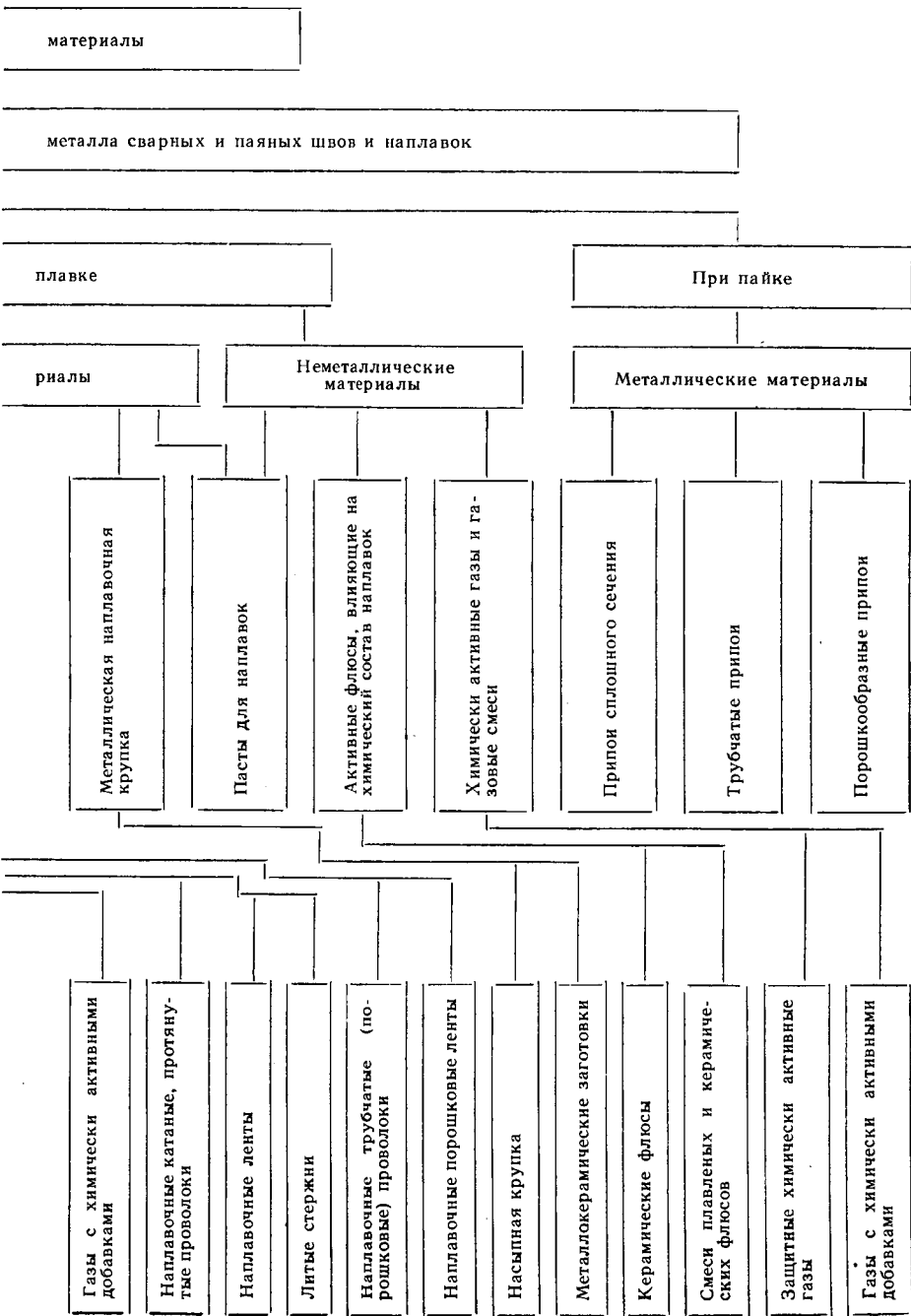
Классификация сварочных материалов в связи с их большим разнообразием чрезвычайно затруднена и до настоящего времени ни в СССР, ни в Международном институте сварки не разработана. Некоторое представление о возможной их классификации дает приведенная ниже упрощенная схема.

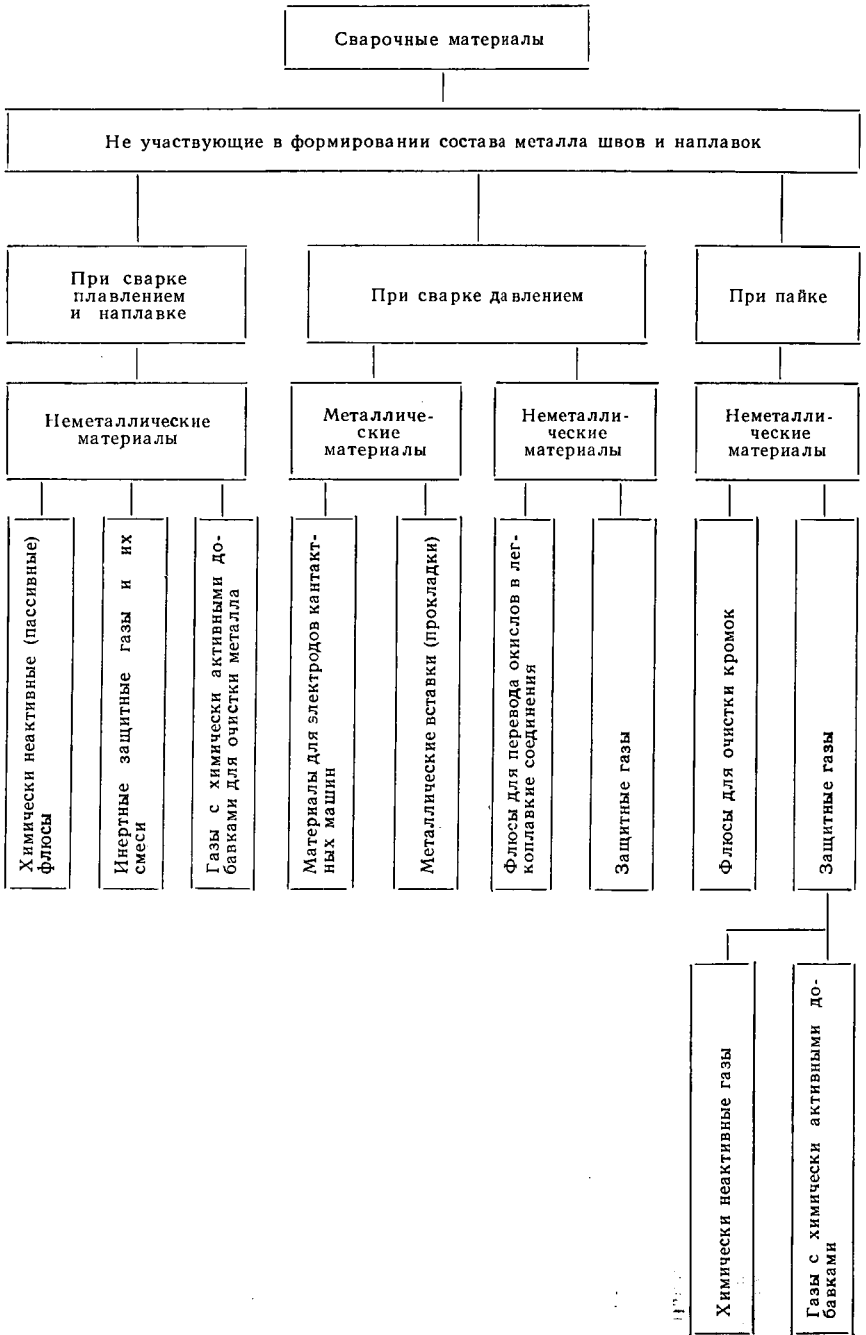
Общий объем применяемых в сварочном производстве материалов очень велик. Так, например, только различных электродных (присадочных) проволок для сварки плавлением в СССР в 1971 г. выпущено около 700 тыс. *t*. Из них около 400 тыс. *t* пошло на изготовление более чем 500 тыс. *t* электродов для ручной дуговой сварки. В том же году было применено более 100 тыс. *t* различных сварочных флюсов. Расход защитных газов для дуговой сварки (в основном углекислый газ и аргон) в настоящее время составляет около 100 тыс. *t* в год.

В большом количестве в сварочном производстве для газопламенной обработки металлов (кислородная резка и др.) используются кислород (сотни тысяч тонн в год) и другие горючие газы.









В меньшем объеме, но весьма разнообразной номенклатуры, изготавливаются и применяются различные другие сварочные материалы: неплавящиеся электроды для дуговой сварки, материалы электродов и губок контактных машин, а также разнообразные специальные присадочные и электродные материалы, припой для пайки и пр.

Суммарное ежегодное потребление сварочных материалов в нашей стране составляет много более 1 млн. *т*. В соответствии с планами перспективного развития на ближайшие 10—15 лет в связи с увеличением выпуска сварных конструкций увеличится и применение всех способов сварки примерно в 1,5—4 раза. Это, естественно, приведет к увеличению общего расхода сварочных материалов: их ежегодное производство, вероятно, достигнет вскоре 2 млн. *т*.

Не менее велико и качественное разнообразие сварочных материалов различного назначения. Так, одной только стальной электродной проволоки, централизованно поставляемой металлургической промышленностью по ГОСТу 2246—60, имеется около 60 различных составов при различном сортаменте по размерам. Каждый периодический пересмотр этого ГОСТа увеличивает количество включенных в него марок. Кроме того, электродные и присадочные материалы поставляются и по другим ГОСТам: например, около десяти марок сварочной проволоки из алюминия и его сплавов, две марки чугунных присадочных материалов и др. Учитывая присадочные (электродные) материалы, потребляемые сварочным производством по различным ведомственным ТУ и другим техническим документам, общее количество таких материалов по маркам превышает 100.

В последние годы в СССР количество марок штучных плавящихся электродов, применяемых для сварочных и наплавочных работ, составило несколько сот. Примерно такое же количество марок электродов применяется и в каждой из других передовых в техническом отношении странах. Из этого количества марок около десяти являются широко применяемыми для изготовления конструкций из обычных сталей, составляющих по объему производства ~90%. Другие марки, используемые отдельными небольшими или средними партиями, применяются для специфических сварочных и наплавочных работ. К ним относятся электроды для сварки среднелегированных и особенно высоколегированных сталей, обеспечивающих получение специальных физических свойств металла швов, электроды для сварки различных цветных металлов и сплавов, наплавочные и др. Именно эта группа электродов по мере развития производства сварных конструкций подвергается наиболее интенсивным исследованиям, так как находит чрезвычайно разнообразное применение. Ряд марок со временем теряет свою актуальность, разрабатываются и применяются новые марки, как заменяющие старые, так и решающие новые задачи.

Велика номенклатура сварочных флюсов. Они применяются при автоматической и полуавтоматической дуговой сварке под слоем флюса, по слою флюса (для алюминиевых сплавов), при газовой сварке, дуговой сварке неплавящимися электродами, при пайке и других процессах. Среди них имеются флюсы массового применения (около 100 тыс. *t* в год) и флюсы со значительно меньшим объемом использования (от тысяч тонн до сотен килограммов в год). В связи с отсутствием систематизированных данных о флюсах количество их марок установить очень трудно, но оно, вероятно, характеризуется величиной около 100 и это количество неуклонно растет, так как разработка новых материалов требует разработки и новых флюсов.

Весьма разнообразны также марки припоев. Некоторые из них гостированы, но большинство марок имеют ведомственное значение и либо изготавливаются непосредственно потребителями, либо поставляются относительно небольшими партиями по специальным техническим условиям.

Все большее применение в сварочном производстве находят различные газы и пары горючих жидкостей. Кроме кислорода для газопламенной обработки используется около десяти разновидностей горючих газов, а для дуговой сварки в среде защитных газов примерно такое же количество инертных и активных газов, а также различных газовых смесей.

Многие сварочные материалы разрабатываются и изготавливаются самими потребителями. Хотя их общее использование в сварочном производстве количественно невелико, влияние их правильного выбора на качество и эксплуатационные характеристики различных сварных конструкций может быть решающим. Поэтому процесс разработки новых сварочных материалов чрезвычайно важен, и многие работники сварочного производства, работающие в различных научно-исследовательских учреждениях, заводских лабораториях и других организациях, связаны с их созданием и производством.

Разработка новых сварочных материалов в основном базируется на проведении экспериментальных исследований, иногда очень трудоемких и дорогих. Это определяется наличием весьма разнообразных факторов, которые необходимо учитывать при разработке новых материалов: стоимость материалов, технологичность их изготовления и применения, обеспечение определенных заданных свойств сварных или паяных соединений при различных способах изготовления конструкций, дефицитность исходных материалов, особенности их поставки и ряд других.

В связи с необходимостью сварки все более и более сложных материалов, применяемых в конструкциях, предназначенных для эксплуатации в весьма разнообразных условиях; при различных видах механических нагрузок (от статических до динамических), при различных температурах в химически агрессивных средах и др., создание необходимых для решения этих задач сварочных

материалов оказывается все труднее и требует значительных затрат для их разработки. Чисто эмпирические методы решения таких задач требуют большой экспериментальной проверки различных вариантов. Естественно, что любое сокращение числа вариантов, хотя бы по принципу исключения, по общим соображениям или предварительным расчетам явно бесперспективных, является чрезвычайно целесообразным. Конечно, предельно рациональным решением могло бы быть расчетное проектирование сварочных материалов на базе накопленного опыта и обобщений, позволяющих осуществлять такой расчет. На данном этапе это не представляется возможным. Однако некоторые общие предпосылки и некоторые расчетные положения по приближенной оценке необходимого количества ряда составляющих электродных покрытий, составам флюсов и других сварочных материалов могут быть чрезвычайно полезны для работников сварочного производства. Они должны быть известны и молодым специалистам при прохождении учебных курсов сварочной специальности. В связи с этим для подготовки инженерно-технических работников по специальности «Металлургия и технология сварочного производства» в Ленинградском ордена Ленина политехническом институте им. М. И. Калинина читается курс «Сварочные материалы. Их проектирование и производство». В нем сделана попытка сбора таких сведений, которые могут быть полезны при создании новых сварочных материалов с точки зрения максимального исключения неправильных путей при их экспериментальной разработке и уменьшения количества исследуемых вариантов.

В излагаемом материале в основном рассматриваются вопросы не организации массового производства наиболее распространенных сварочных материалов общего назначения, а необходимые сведения для разработки новых материалов специального назначения.

В качестве приложения приведены некоторые сведения из ГОСТов по различным сварочным материалам, применяемым видам сырья и некоторые другие.

# ВЛИЯНИЕ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И НАПЛАВЛЕННЫХ СЛОЕВ

## § 1.1. Строение сварных соединений

При наиболее распространенных способах сварки плавлением в результате действия источника сварочного тепла образуется ванна расплавленного металла — сварочная ванна, которая после затвердевания — кристаллизации обеспечивает создание металлической связи с нерасплавленными зонами свариваемых элементов. Распространение тепла в свариваемых элементах приводит к нагреву того или иного из объемов, прилегающих к расплавленной зоне. По мере удаления от зоны нагрева обычно подвижного источника сварочного тепла температура металла снижается и в свариваемых изделиях значительных размеров достигает их начальной температуры (температуры окружающей среды). В некоторых объемах металла, получивших при этом нагрев выше некоторой минимальной температуры, зависящей от состава свариваемого металла и его состояния перед сваркой (наличия наклепа, структуры закалки и пр.), происходит изменение структуры и свойств. В целом такая измененная в результате сварки область свариваемого металла называется зоной термического воздействия или зоной термического влияния (ЗТВ).

Сварные соединения работают в различных условиях, в связи с чем к ним предъявляются и различные требования.

В большинстве случаев основным требованием, предъявляемым к сварным соединениям, является обеспечение ими необходимой механической прочности конструкции. В качестве других требований могут быть отмечены: обеспечение плотности (герметичности), химической стойкости, жаропрочности и др. В ряде случаев требования могут быть комплексными: например, сварные соединения некоторых трубопроводов должны быть и прочными, и плотными; соединения корпусов судов — прочными, плотными и коррозионностойкими в слабоагрессивных средах (вода, морская вода); в химических агрегатах — и прочными, и плотными, и химически стойкими в среде той или иной степени агрессивности.

С точки зрения гарантии свойств и служебных характеристик конструкций безразлично, за счет какой составляющей — основного металла или любой зоны сварного соединения (металла

шва, зоны измененных свойств основного металла в результате сварки) она окажется ненадежной, разрушится, выйдет из строя, перестанет выполнять свое назначение. Поэтому в сварных соединениях в целом необходимо обеспечивать, чтобы комплекс их свойств отвечал требуемой надежности в условиях эксплуатации. В связи с этим и все составляющие сварных соединений должны обеспечивать необходимую надежность сварных конструкций.

Рассмотрим схему сварного соединения (рис. 1.1).

Расплавившийся при сварке металл и впоследствии закристаллизовавшийся образует металл шва (1), имеющий либо литую структуру (при однослойной сварке, выполняемой в один проход на все сечение), либо структуру литого металла, подвергшегося в некоторой своей части дополнительной термической обработке при последующих нагревах (в случае выполнения сварки в несколько проходов).

Металл шва своими кристаллами (образовавшимися при кристаллизации металлических связями) связан с зернами не расплавлявшегося при сварке свариваемого металла, обычно не

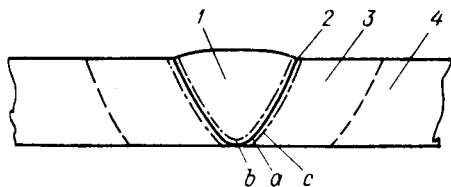


Рис. 1.1. Схема поперечного разреза сварного соединения

литого, а получившего перед сваркой термопластическую обработку (проковку, прокатку), иногда холодную пластическую (холодную прокатку, гибку и пр.), а также термическую обработку (нормализацию, закалку и др.). Переход 2 от металла шва к не расплавлявшемуся при сварке основному металлу называется обычно границей сплавления, хотя по существу она имеет ту или иную линейную протяженность (в поперечном сечении соединения, согласно рис. 1.1) и является зоной сплавления. Такая зона должна включать в себя не только участок металла, расплавленного частично, вследствие наличия разницы температур ликвидуса (полного расплавления основного металла) и солидуса (температуры начала его плавления), т. е. участок, где в связи с неполным расплавлением при сварке имело место двухфазное твердое состояние, но и прилегающие к ней участки полностью не расплавленного основного металла и металла шва, по химическому составу отличающихся и от основного свариваемого металла и от более удаленных от этой зоны участков металла шва. Условно на рис. 1.1 эти границы показаны: линией *a* — видимая граница сплавления и линиями *b* и *c* — обычно невидимые участки специфических составов с химической неоднородностью по ширине участка *c—b*.

Далее от металла шва 1, за зоной сплавления 2 в сварном соединении располагается зона термического влияния 3. Металл этой зоны по химическому составу обычно по всем элементам, кроме водорода (который может в нее диффундировать при сварке,

а в некоторых случаях и при вылеживании сварных соединений при обычных или повышенных температурах), аналогичен свариваемому основному металлу, но может от него отличаться структурой и свойствами. Характер этих изменений в зависимости от состава свариваемого металла может быть весьма разнообразным. Так, у металлов и сплавов, не имеющих полиморфных превращений (медь, алюминий или некоторые сплавы на их основе), поступивших на сварку в термически стабилизированном состоянии (после отжига при оптимальных температурах), в такой зоне наблюдается укрупнение зерен, иногда изменение (часто утолщение) границ зерен, появление двойников и пр. В некоторых случаях имеет место выпадение химических соединений: например, во многих аустенитных хромоникелевых сталях — выпадение карбидов, главным образом у границ зерен. Могут происходить и другие изменения как обнаруживаемые, так иногда и необнаруживаемые при обычных методах металлографического анализа структуры, но вызывающие изменение тех или иных физико-механических свойств металла в сравнении с его исходным состоянием.

Для металлов, обладающих полиморфизмом, в такой зоне обычно заметно изменяется структура в участках, где температура нагрева при сварке превосходила критические температуры, при которых устойчивая решетка низкотемпературной фазы (например, решетка объемноцентрированного куба  $Fe_\alpha$ ) перестраивается в кристаллическую решетку высокотемпературной фазы (в этом случае — гранецентрированного куба  $Fe_\gamma$ ). После обычного при сварке ускоренного охлаждения в этих зонах при распаде высокотемпературной фазы получают неравновесные структуры продуктов распада, естественно, со своими особыми свойствами.

Вся зона термического влияния, как правило, неоднородна по структуре и в своих отдельных участках имеет заметно изменяющиеся свойства. В некоторых случаях общая работоспособность сварного соединения определяется размером и свойствами определенного участка зоны термического влияния.

За зоной термического влияния следует не измененный ни по структуре, ни по свойствам основной металл.

В большинстве случаев для обеспечения надежной работы конструкции должен быть правильно выбран материал, в частности металл, для ее изготовления. При правильном выборе металла комплекс его свойств обеспечивает все необходимые эксплуатационные, рабочие характеристики конструкции. Материал сварных соединений также должен обеспечивать надежную работу сварной конструкции в целом.

С этой точки зрения (предполагая необходимость правильного конструирования и изготовления, включая сварку) свойства основного металла могут рассматриваться как эталон, воспроизведение свойств которого в сварных соединениях решает задачу надежности всей сварной конструкции.



Свойства сварных соединений в сравнении со свойствами основного металла должны рассматриваться как комплексно — основной металл — сварное соединение, так в некоторых случаях и дифференцированно — основной металл — участок (составляющая) сварного соединения.

Для упрощения задачи пренебрежем общей характеристикой основного металла — сварное соединение и рассмотрим соотношения свойств основной металл — составляющие сварного соединения. В данном случае будем сравнивать неизменный термическим циклом основной металл с металлами зоны термического влияния, зоны сплавления и металлом швов. Начнем с сопоставления основного металл — металл шва.

Металл шва — литой металл, правда, полученный в специфических условиях обработки и кристаллизации, характерных для сварки. Основной металл в большинстве случаев улучшается термопластической, а иногда и термической обработкой.

Известно, что, как правило, литой металл обладает худшим комплексом свойств, чем горячедеформированный и термически улучшенный. Чем же обеспечить сопоставимость свойств литого металла шва и улучшенного основного металла?

Свойства металлов и сплавов определяются их химическим составом и структурой. Так как в ряде случаев даже относительно благоприятная литая структура сварного шва все же хуже улучшенной структуры основного металла, то одним из наиболее действенных средств улучшения его свойств является подбор химического состава металла шва, позволяющего относительно сблизить его свойства со свойствами основного металла, обычно улучшенного дополнительной обработкой. Поэтому, как правило, при выполнении сварки стремятся получить состав металла шва, отличающийся от основного металла, но имеющий необходимые свойства, например прочностные, близкие к эталону — основному металлу\*.

Регулировать состав металла шва можно используя необходимые для этих целей сварочные материалы. Так, обычно состав однопроходного металла шва образуется в результате смешивания расплавленных основного и добавочного (наплавляемого) металлов. Наплавленный металл — это продукт переработки сварочных материалов (присадочной или электродной проволоки, плавящихся электродов и пр.) при конкретном способе сварки, поступивший через ванну в металл сварного шва. Выбирая для каждого конкретного способа сварки соответствующие сварочные материалы, можно активно воздействовать на состав металла шва и, как следствие, обеспечивать его свойства, т. е.

---

\* Иногда выбор химического состава шва приводит к значительному изменению его свойств по сравнению с основным металлом (например, увеличение пластичности шва при уменьшении прочности); в ряде случаев это оправдано.

выбор сварочных материалов определяет возможность активного регулирования состава и свойств металла шва.

Зона сплавления, как указано выше, в основном определяется переходными составами металла от основного к шву. Большая ее часть находится при сварке в расплавленном или полурасплавленном состоянии. Поэтому в той или иной степени состав металла зоны сплавления также связан с составом металла ванны, а следовательно, с составом наплавляемого металла. Иными словами, подбор сварочных материалов является важным средством активного вмешательства также и в свойства металла зоны сплавления.

Свойства зоны термического влияния в основном определяются термопластическим циклом, сопровождающим выполнение сварки и связанным со способом и режимом сварки. Степень сосредоточенности или распределенности источника сварочного тепла и его мощность определяют локальность расплавления металла, размеры сварочной ванны, количество тепла, отводимого в окружающий нерасплавляющийся металл, а следовательно, температурное поле в свариваемом изделии и термические циклы соответственно расположенных объемов металла. Это определяет скорости их нагрева, длительность пребывания при высоких температурах, вызывающего рост зерна и другие явления, а также скорости охлаждения, весьма важные для конечных свойств металла. Поэтому в большинстве случаев средством активного вмешательства в свойства металла зон термического влияния является правильный выбор способа сварки и режима сварки.

Однако в некоторых случаях на свойства металла зон термического влияния и особенно наиболее высоконагреваемых при сварке участков, близких к границе сплавления, влияет и правильный выбор сварочных материалов. Это влияние определяется как количеством водорода, диффундирующего из шва в зону термического влияния, так и полем собственных внутренних напряжений в околошовной зоне, связанным с соотношением составов и свойств металлов шва и зоны термического влияния. Пластические свойства сварных соединений, иногда сразу после сварки невысокие, восстанавливаются, возрастая в несколько раз после выдержки при комнатной температуре. Темп и степень такого повышения пластичности часто определяются количеством водорода, вводимого в металл шва при том или ином способе сварки и применяемых сварочных материалах.

К ряду изделий предъявляются специфические требования в отношении свойств поверхностей деталей, узлов или всей конструкции. Так, например, поверхности рельсов, направляющих станков и пр. работают на истирание, абразивный износ. У других изделий поверхность может работать в контакте с химически агрессивными газами или жидкостями (этот металл должен быть химически стойким). Иногда эти условия усложняются одновременным действием повышенных температур и ударного механи-

ческого воздействия (например, клапаны двигателей). Следовательно, такие детали или узлы конструкции должны иметь не только определенную форму (что достигается применением соответствующей технологии изготовления заготовок и обычно механической их обработкой) и механическую прочность (обеспечиваемую свойствами металла детали и ее размерами), но некоторые их поверхности должны обладать специфическими свойствами.

Одним из наиболее эффективных средств получения таких деталей (изделий) является комбинирование в них двух металлов, причем из одного делается основная часть детали, обеспечивающая ее форму, размеры, прочность, а из другого — поверхности, работающие в особых условиях. Как распространенный метод решения

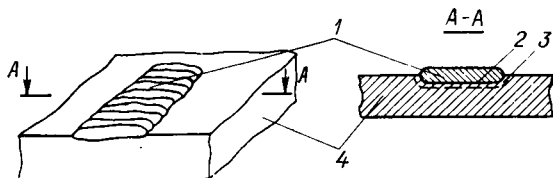


Рис. 1.2. Схема наплавки на деталь

этой задачи известна наплавка, которая заключается в том, что на соответствующие поверхности сварочными методами наплавляют слой металла, имеющего необходимые свойства.

Схематически наплавка части поверхности плоской детали показана на рис. 1.2.

Наплавка 1, осуществленная сварочными методами на основной металл 4, также будет сопровождаться наличием зоны сплавления 2 и зоны термического влияния 3.

В связи с тем, что к слою наплавки 1, особенно к ее поверхности, предъявляются обязательные требования специфичности свойств, это обычно достигается выбором состава металла наплавки. Его можно получить радикально отличающимся от состава основного металла 4 только путем применения специальных наплавочных материалов.

Таким образом, и в этом случае методом активного влияния на состав, а следовательно, и свойства наплавленных слоев поверхностей является выбор сварочных (наплавочных) материалов. При этом необходимо учитывать сварочные свойства материала, на который производится наплавка, так как довольно часто определяющим при наплавке являются не свойства наплавляемого материала, а те дефекты, которые возникают в районе зоны сплавления (трещины, отколы и т. п.).

Подобным же примером может служить, например, пайка, при которой свойства соединений и их надежность также во многом зависят от правильного выбора материала — припоя.

## § 1.2. Общая схема формирования химического состава металла сварных швов и наплавок при сварке плавлением

Металл сварных швов при сварке плавлением формируется либо за счет расплавления только основного металла, либо, более часто, за счет расплавления основного и добавочного (присадочного металла).

В процессе сварочной операции расплавленный металл взаимодействует с окружающей его материальной средой (газами, неметаллическими расплавами — шлаками и пр.) и получает те или иные изменения, связанные с испарением некоторых составляющих при высоких температурах сварочного пространства, образованием различных химических соединений, нерастворимых в металле, и др. В целом эти изменения характерны как для расплавляемого основного металла, находящегося в сварочной ванне, так и для поступающего в ванну добавочного металла. Как правило, поступающий в ванну добавочный металл при основных способах сварки плавлением (электрическая дуговая сварка, особенно плавящимся электродом; электрошлаковая сварка) нагревается до более высоких температур, чем в ванне, и имеет большую контактирующую со средой удельную поверхность (отношение поверхности к объему). Поэтому все процессы взаимодействия с окружающей средой, происходящие через поверхность и интенсифицированные более высокой температурой, приводят, как правило, к большему изменению состава добавочного металла, чем расплавляемого составного. Этот измененный в процессе сварки добавочный металл называется наплавленным металлом.

Рассмотрим формирование состава металла шва на примере дуговой сварки плавящимся электродом.

При автоматической (или полуавтоматической) сварке под флюсом с расплавленным шлаком и газами взаимодействуют и капли электродного металла, и расплавленный основной металл, находящийся в сварочной ванне. В целом состав металла шва, выполненного в один проход, по любому элементу  $X$  можно выразить в виде долевого участия основного и электродного металлов, концентраций этого элемента в них и изменений этих концентраций, происходящих при сварке, формулой [1]

$$[X]_{шв_1} = \psi_1 \{ [X]_{ом} \pm \Delta X_{ом} \} + (1 - \psi_1) \{ [X]_{эп} \pm \Delta X_{эп} \}, \quad (1.1)$$

где  $\psi_1$  и  $1 - \psi_1$  — доля основного и электродного металлов в металле шва;

$[X]_{шв_1}$ ;  $[X]_{ом}$ ;  $[X]_{эп}$  — концентрация элемента  $X$  соответственно в металлах однопроходного шва, основном и электродной проволоки;

$\Delta X_{осн}$ :  $\Delta X_{эп}$  — изменения в составах основного и электродного металлов, произошедшие при сварке (знаком плюс показано приращение, например от взаимодействия металла со шлаком, а знаком минус — потери, например от окисления или испарения).

В связи с тем, что изменения, происходящие в основном и электродном металлах, отделить друг от друга не удается, большим распространением пользуется другая формула [2]

$$[X]_{шв1} = \psi_1 [X]_{осн} + (1 - \psi_1) [X]_{эп} \pm \Delta X, \quad (1.2)$$

где  $\Delta X$  — обобщенное изменение состава металла (как основного, так и электродного) в процессе сварки.

При этом сумма  $\psi_1 [X]_{осн} + (1 - \psi_1) [X]_{эп}$  рассматривается как исходная концентрация элемента  $X$  в ванне, получаемой смешиванием не измененных сваркой основного и электродного металлов.

При сварке штучными электродами формирование состава металла шва можно представить в виде смешивания наплавленного металла, состав которого экспериментально может быть определен с достаточной степенью точности, и измененного сваркой расплавленного основного металла. За исключением газов (кислород, азот, водород) для основного металла возможны при сварке только потери элементов, которые можно оценить в относительных величинах коэффициентом усвоения  $k_y$ . Тогда состав металла шва оценивается формулой [48]

$$[X]_{шв1} = \psi_1 [X]_{осн} k_y + (1 - \psi_1) [X]_{нм}, \quad (1.3)$$

где  $[X]_{нм}$  — концентрация элемента  $X$  в наплавленном металле, получаемая как результат взаимодействия электродного стержня, покрытия и изменений состава металла, вызываемых процессом сварки.

В связи с тем, что основным фактором, вызывающим изменения состава расплавляемого электродного стержня при сварке, является его взаимодействие с электродным покрытием, а их относительные количества (например, относительный вес покрытия к весу стержня) постоянны,  $[X]_{нм}$  практически мало зависит от режима сварки и может считаться некоторой постоянной характеристикой электрода определенной марки.

Для ряда элементов, обладающих относительно небольшой химической активностью, в частности мало окисляющихся, и при их относительно малых потерях испарением (при высокой температуре кипения или при степени испарения сопоставимой с основой сплава, образующего металл шва) коэффициент усвоения элемента из основного металла  $k_y$  может быть приближенно принят равным единице. В связи с тем, что и доля участия основного металла в шве при ручной сварке значительно меньше, чем при

сварке под флюсом, и, как будет показано далее, редко превышает значения 0,25—0,3, то и сама поправка, вводимая  $k_y$  в абсолютном значении, как правило, невелика. Поэтому для приближенной оценки состава металла швов ею можно пренебречь. Тогда формула (I.3) упрощается [48]

$$[X]_{мш_1} = \psi_1 [X]_{ом} + (1 - \psi_1) [X]_{нм}. \quad (I.4)$$

Расчеты состава металла шва при ручной дуговой сварке штучными электродами по большинству легирующих элементов, при правильно выбранном значении  $\gamma$  (по результатам экспериментов или на основании обобщений по ранее выполненным работам) дают весьма удовлетворительное совпадение с результатами анализа металла швов. Это позволяет пользоваться такой схемой оценки формирования металла шва при ручной сварке для ряда практических целей.

Изменения  $\Delta X$  при сварке под флюсом по формуле (I.2) не являются столь же стабильными и в значительной степени зависят от режима сварки. Это определяется как изменением относительного количества шлака на единицу расплавляемого металла при изменении режимов сварки [68], так и изменением характера перехода и взаимодействия металл — флюс при различных напряжениях дуги и плотности тока в электродной проволоке [80, 50].

Однако в связи с тем, что и при сварке под флюсом основные изменения состава происходят в электродном металле до его поступления в ванну [68] в большей степени, чем в расплавленном основном, приближенно все изменение  $\Delta X$  можно отнести к изменению состава электродной проволоки. Тогда формула (I.2) может быть преобразована

$$\begin{aligned} [X]_{мш_1} &= \psi_1 [X]_{ом} + (1 - \psi_1) [X]_{эп} \pm \Delta [X] = \\ &= \psi_1 [X]_{ом} + (1 - \psi_1) \{ [X]_{эп} \pm \Delta [X'] \}, \end{aligned} \quad (I.5)$$

где  $\Delta [X'] = \frac{\Delta X}{1 - \psi_1}$ .

Тогда выражение  $\{ [X]_{эп} \pm \Delta [X'] \}$  можно считать идентичным  $[X]_{нм}$  в формуле (I.4).

По материалам М. Д. Щипкова [73] такая упрощенная схема оказывается в ряде случаев применимой и дающей возможность оценить составы металлов швов при некоторых обычных средних режимах сварки.

По аналогичным формулам можно рассчитывать и состав первого слоя наплавки, осуществляемой на поверхность основного металла.

Оценим теперь значения величины  $\psi$ , а следовательно, и  $(1 - \psi)$ .

Экспериментально эти величины определяются по макрошлифам швов или наплавов (рис. I.3). Применительно к наплавкам на поверхность на макрошлифах (рис. I.3, а) можно провести линию условного раздела расплавленного основного и наплавлен-

ного металлов. Тогда величины площадей  $S_{ом}$  и  $S_{нм}$ , измеренные, например, планиметром на фотографиях или увеличенных проекциях на экран, могут быть пересчитаны в массы основного и наплавленного металлов в шве. Действительно, если считать, что площади  $S_{ом}$  и  $S_{нм}$  являются достаточно постоянными по всей длине  $L$  шва (наплавленного валика), что может быть уточнено измерениями на нескольких макрошлифах, то массы расплавленного основного металла  $G_{ом}$  в шве и наплавленного  $G_{нм}$  будут соответственно равны

$$G_{ом} = LS_{ом}\gamma_{ом}; \quad G_{нм} = LS_{нм}\gamma_{нм}.$$

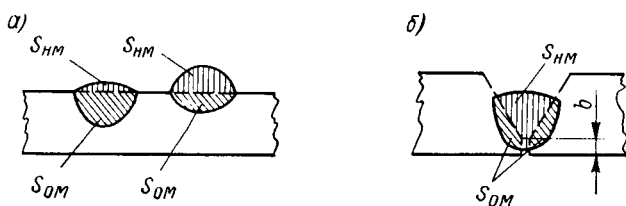


Рис. 1.3. Определение долей наплавленного и основного металлов в валике наплавки (а) и корневом слое стыкового шва (б)

Если плотности  $\gamma_{ом}$  и  $\gamma_{нм}$  достаточно близки друг к другу (принимая  $\gamma_{ом} = \gamma_{нм}$ ), то общая масса металла шва (наплавки)  $G_{ми}$  ( $G_n$ ) будет равна

$$G_{ми} = G_{ом} + G_{нм} = L\gamma_{ом}(S_{ом} + S_{нм}).$$

Для основного металла в металле шва

$$\psi = \frac{G_{ом}}{G_{ми}} = \frac{LS_{ом}\gamma_{ом}}{L(S_{ом} + S_{нм})\gamma_{ом}} = \frac{S_{ом}}{S_{ом} + S_{нм}},$$

а доля наплавленного металла в шве

$$1 - \psi = \frac{G_{нм}}{G_{ми}} = \frac{LS_{нм}\gamma_{ом}}{L(S_{ом} + S_{нм})\gamma_{ом}} = \frac{S_{нм}}{S_{ом} + S_{нм}}.$$

При заметном различии  $\gamma_{ом}$  и  $\gamma_{нм}$  это также может быть учтено расчетом.

Доля основного металла в металле однопроходного шва (одиночного наплавленного валика) зависит от способа сварки, режима сварки (например, при дуговой сварке плавящимся электродом — от  $U_d$ ,  $I_{св}$  и  $V_{св}$ ), теплофизических свойств свариваемого металла, формы и размеров разделки кромок под сварку. Для обычных режимов ручной дуговой сварки плавящимся электродом, а также обычных типовых режимов сварки под флюсом малоуглеродистых и низколегированных сталей доля основного металла  $\psi_1$  в металле шва при отсутствии разделки (согласно рис. 1.3, а) изменяется в следующих пределах: при ручной сварке — от 0,25 до 0,40; при сварке под флюсом — от 0,65 до 0,70.

При других теплофизических свойствах основного металла (и электропроводности металла электродной проволоки, определяющей ее скорость плавления) эти значения  $\psi_1$  могут быть другими. Так, в случае аналогичного выполнения швов (валиков) на аустенитной хромоникелевой стали (типа IX18H9T) такой же проволокой (электродами) значения  $\psi_1$  изменяются: при ручной сварке — от 0,30 до 0,50; при сварке под флюсом — от 0,65 до 0,75.

При сварке шва в разделку, например корня шва (рис. 1.3, б), доля основного металла может быть иной, причем при сварке под флюсом меньше, чем при наплавке на поверхность, а при ручной сварке и ограниченной величине притупления разделки  $b$  больше,

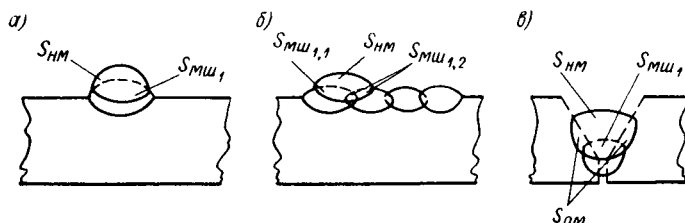


Рис. 1.4. Изменение доли основного металла во втором валике наплавки (а), в валиках по слоям (б) и в слоях стыкового шва (в)

чем при наплавке на поверхность. Так, при ручной сварке хромоникелевых аустенитных сталей в корневом шве доля основного металла обычно составляет 0,40—0,50.

Сложнее осуществляется расчет состава многослойных наплавов и особенно швов в разделку.

Рассмотрим формирование состава последующих слоев наплавки в простейшем случае — слоя на слой (рис. 1.4, а), считая, что наплавленный металл для второго слоя такой же, как для первого, а в качестве основного металла оказывается металл первого слоя (валика) наплавки.

Тогда по формуле (1.4) или подобной ей формуле (1.5) состав металла шва (валика) второго слоя будет

$$[X]_{ми_2} = \psi_2 [X]_{ми_1} + (1 - \psi_2) [X]_{нм}, \quad (1.6)$$

где  $\psi_2$  — доля участия металла первого слоя в металле шва (наплавки) второго слоя.

Заменяя  $[X]_{ми_1}$  на его значение по формуле (1.4), получим

$$[X]_{ми_2} = \psi_2 \{ \psi_1 [X]_{ом} + (1 - \psi_1) [X]_{нм} \} + (1 - \psi_2) [X]_{нм},$$

а после простейших преобразований [48] при  $\psi_1 = \psi_2 = \psi$

$$[X]_{ми_2} = \psi^2 [X]_{ом} + (1 - \psi^2) [X]_{нм}. \quad (1.7)$$

Так как  $\psi < 1$ ,  $\psi^2 < \psi$ , т. е. доля участия основного металла в металле второго слоя наплавки меньше, чем в первом, а доля наплавленного — больше.



Соответственно в  $n$ -м слое состав будет определяться формулой

$$[X]_{ми_n} = \psi^n [X]_{ом} + (1 - \psi^n) [X]_{нм}. \quad (I.8)$$

Практически формирование состава наплавки происходит сложнее. Действительно, по принятой технологии наплавки слоя, состоящего из отдельных валиков, каждый последующий валик в слое перекрывает предыдущий на  $1/4 - 1/3$  его ширины (рис. I.4, б). В этом случае второй валик ( $MШ_{1,2}$ ) первого слоя уже будет являться продуктом смешивания металлов трех химических составов — расплавленного основного ( $ОМ$ ), наплавленного ( $НМ$ ) и металла первого валика ( $MШ_{1,1}$ ). Если представить второй валик первого слоя состоящим из доли  $\psi'$  основного металла, доли  $\psi''$  металла валика  $MШ_{1,1}$  и  $[1 - (\psi' + \psi'')]$  наплавленного металла, то можно оценить отличие состава  $MШ_{1,2}$  от состава  $MШ_{1,1}$  и далее  $MШ_{1,2}$  до  $MШ_{1,3}$ .

В связи с тем, что общая формула ясного представления об этом не дает, приведем численный пример: пусть  $[X]_{ом} = 1\%$ ;  $[X]_{нм} = 5$   $[X]_{ом} = 5\%$ ;  $(1 - \psi) = 0,6$ ;  $\psi' + \psi'' = 0,4$  (при этом для обычных соотношений  $\psi' \approx 0,16$  и  $\psi'' \approx 0,24$ ). Тогда:

$$[X]_{ми_{1,1}} = 0,4 \cdot 1\% + 0,6 \cdot 5\% = 3,4\%;$$

$$[X]_{ми_{1,2}} = 0,24 \cdot 1\% + 0,6 \cdot 5\% + 0,16 \cdot 3,4\% = 3,78\%;$$

$$[X]_{ми_{1,3}} = 0,24 \cdot 1\% + 0,6 \cdot 5\% + 0,16 \cdot 3,78\% = 3,85\%.$$

Как следует из расчета, разница составов  $MШ_{1,1}$  и  $MШ_{1,2}$  может быть значительной, а в дальнейшем отличие  $MШ_{1,3}$  от  $MШ_{1,2}$  уже незначительно.

Соответственно будут несколько отличаться и составы валиков во втором слое, т. е.  $MШ_{2,1}$  и  $MШ_{2,2}$  и т. д., хотя различие между ними будет уже меньше — они будут ближе к составу наплавленного металла [в соответствии с формулой (I.7)].

Рассмотрим теперь формирование состава различных слоев стыкового шва в разделку (рис. I.4, в). В этом случае второй слой также будет формироваться из трех составляющих: основного металла в количестве  $\psi' = \frac{S_{ом}}{S_{ом} + S_{ми_1} + S_{нм}}$ , наплавленного

металла с долей  $(1 - \psi') = \frac{S_{нм}}{S_{ом} + S_{ми_1} + S_{нм}}$  и металла  $MШ_1$

со значением  $\psi'' = \frac{S_{ми_1}}{S_{ом} + S_{ми_1} + S_{нм}}$ . Аналогично примеру по

сопоставлению составов  $MШ_{1,1}$ ,  $MШ_{1,2}$  и  $MШ_{1,3}$  при много-валиковой наплавке первого слоя переход от слоя к слою и в стыковых швах показывает большее количество основного металла в последующих слоях и относительное уменьшение доли наплавленного металла по сравнению с чистой наплавкой по схеме рис. I.4, а.

Изменение доли основного металла от слоя к слою в аустенитных хромоникелевых электродах и подобном же основном металле для случая ручной наплавки и сварки стыковых швов с различной разделкой показано на рис. 1.5.

На рисунке доли основного металла в различных слоях показаны для наглядности монотонно снижающимися зависимостями, хотя в действительности смена долей происходит прерывисто: в первом слое одна постоянная, во втором — другая и т. д. Как следует из приведенных зависимостей, наиболее быстро доля основного металла от слоя к слою снижается в наплавках. Это указывает, что при значительной разнице составов основного и наплавляемого металлов различие между слоями может быть весьма большим. Уже в четвертом слое доля основного металла составляет 5—7% и наплавка состоит почти из чистого (93—95%) наплавленного металла. В стыковых швах, особенно с узкой глубокой разделкой, это уменьшение доли основного металла происходит заметно слабее. Так, при обычном угле раскрытия кромок в 60° в четвертом слое шва сохраняется около 25% основного металла (т. е. ~75% наплавленного). Поэтому встречающийся

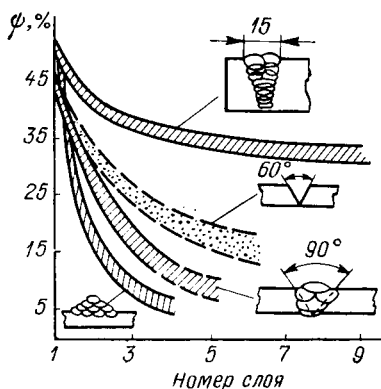


Рис. 1.5. Изменение доли основного металла при ручной сварке хромоникелевой аустенитной стали в различных слоях наплавки и стыковых швов с различной разделкой под сварку

до сих пор в сварочной литературе термин «наплавленный металл», используемый применительно ко всему расплавленному при сварке металлу (т. е. металлу шва), является неправильным. Металл шва может значительно отличаться от наплавленного металла по составу и свойствам, и это должно учитываться при выборе сварочных материалов (в частности, плавящихся электродов) для сварки тех или иных изделий.

Учитывая все отмеченное выше, можно заключить, что средством регулирования химического состава, а следовательно, и свойств металлов швов является соответствующий выбор сварочных материалов. При этом влияние режима сварки особенно значительно может проявляться при автоматической и полуавтоматической сварке, сварке плавящимся электродом под флюсом, при электрошлаковой сварке и в меньшей степени при ручной сварке штучными электродами. При аргоно-дуговой сварке неплавящимся электродом, а также при газовой сварке плавлением

регулирование химического состава металла швов достигается соответствующим выбором присадочного металла и его относительным количеством, вводимым в сварочную ванну, т. е. долевым участием в шве. Это достигается подбором формы кромок,готавливаемых под сварку, и регулированием расплавления основного и присадочного металла.

### § 1.3. Формирование химического состава металла вблизи границы сплавления

Рассмотренное выше формирование состава металла шва или отдельных его слоев (валиков) дает только усредненные значения. Условия перемешивания основного и наплавленного металла в сварочной ванне в целом достаточно хорошие, и это приводит к хорошему усреднению состава жидкого металла за время существования ванны. Поэтому средние части объема металла каждого отдельного валика однопроходного шва получаются по своему химическому составу достаточно равномерными, даже в тех случаях, когда расплавленные основной и наплавляемый металлы имеют весьма различные составы [48]. Однако вблизи границы сплавления, где образуется граничный слой жидкости с замедленным движением, перемешивание расплавленного основного металла и наплавленного полностью происходить не успевает,

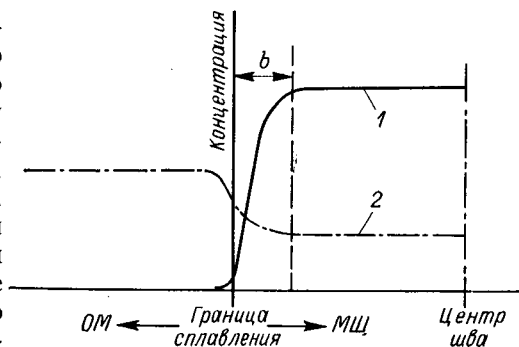


Рис. 1.6. Схема изменения концентраций неликвидирующих элементов вблизи границы сплавления при большей концентрации элементов в наплавленном металле, чем в основном (1) и меньшей (2);

$b$  — ширина зоны переменного состава

чему дополнительно способствует и малое время существования жидкого металла в этой части ванны [48]. В связи с этим в некоторой зоне (обычно в пределах около 5% глубины или полуширины ванны) вследствие недостаточного перемешивания состав металла оказывается не таким, как в средних частях ванны, а по легирующим, неликвидирующим примесям — промежуточным между центральными объемами ванны и основным металлом. Чем больше различие составов основного металла и металла шва (определяемого в этом случае большим отличием состава наплавленного металла от основного), тем более неравномерным будет в этой переходной зоне и состав металла шва вблизи границы сплавления. Схема изменения состава металла от центральных частей шва к границе сплавления показана на рис. 1.6.

Известно также, что на этом же участке металла шва в результате прерывистости процесса кристаллизации имеет место весьма неравномерное распределение ликвирующих примесей с их накоплением в слоях, эквидистантно расположенных по отношению к границе сплавления [48, 41, 8].

В процессе сварки сплавов зона сплавления находится в двухфазном твердо-жидком состоянии. Ширина этой зоны  $a$  зависит от интервала кристаллизации (разности температур ликвидус — солидус) и градиента температур в направлении, перпендикулярном этой зоне,

$$a = \frac{T_L - T_S}{\left(\frac{\Delta T}{\Delta R}\right)_{T_{на}}} \quad (1.9)$$

Здесь  $T_L$  и  $T_S$  — соответственно температуры ликвидус и солидус свариваемого металла в °С;

$\frac{\Delta T}{\Delta R}$  — градиент температур в °С/см; в плоскости свариваемого металла он равен  $\frac{\Delta T}{\Delta y}$ , а вблизи участка максимального проплавления  $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ , где  $y$  отсчитывается перпендикулярно линии перемещения источника тепла в плоскости свариваемого изделия, а  $z$  — перпендикулярно его поверхности в глубину тела;

$$R = \sqrt{y^2 + z^2}.$$

Температурный интервал ликвидус—солидус у различных сплавов изменяется в широких пределах. У углеродистых сталей, содержащих ~0,2% углерода, он около 30° С, а у сталей с ~0,5% углерода — около 100° С.

Градиент температур у границы сплавления для обычных способов сварки сталей в основном находится в пределах 350—80° С/мм (3500—800° С/см). При электроннолучевой сварке этот градиент еще больше и может составлять до 600° С/мм.

Пользуясь этими значениями, можно оценить ширину зоны твердо-жидкого состояния при сварке вблизи границы сплавления. Так, для малоуглеродистой стали (~0,2% С) при дуговой сварке ( $\frac{\Delta T}{\Delta R} \approx 2500^\circ \text{С/см}$ )  $a = \frac{30}{2500} \approx 0,011 \text{ см}$ , или 0,11 мм, а при газовой ( $\frac{\Delta T}{\Delta R} \approx 1200^\circ \text{С}$ )  $a = \frac{30}{1200} \approx 0,025 \text{ см}$ , или 0,25 мм. Как следует из этих расчетов, величина такой зоны может быть достаточно заметной.

В какой-то степени некоторые элементы из металла сварочной ванны за счет диффузии проникают и в околошовную зону, в нерасплавлявшийся при сварке металл. Большинство легирующих элементов (например, Cr, Ni, Nb, Mn и др.) имеют более или менее

заметные значения коэффициентов диффузии в железе (порядка  $10^{-7}$ — $10^{-9}$   $\text{см}^2/\text{сек}$ ) только при температурах выше  $1200$ — $1300^\circ \text{C}$ . Поэтому при охлаждении металла околошовных зон ниже этих температур при длительностях термического сварочного цикла (единицы секунд при этих температурах) их проникновение в твердый металл обычно ограничивается зоной  $0,001$ — $0,003$   $\text{см}$  ( $0,01$ — $0,03$   $\text{мм}$ ) [48]. Эксперименты с радиоактивным  $\text{Nb}^{95}$  [31] показали примерно такой же порядок ширины зоны его проникновения из шва в околошовную зону.

Сильнее диффундирует углерод (даже при  $900^\circ \text{C}$  его коэффициент диффузии в  $\text{Fe}_\alpha$  имеет порядок  $10^{-7}$   $\text{см}^2/\text{сек}$ ). В связи с этим он заметно перемещается в большем диапазоне температур, а следовательно, и в течение более длительного времени в термическом цикле сварки. При различных режимах сварки он успевает продиффундировать в твердом металле околошовных зон на  $0,05$ — $0,2$   $\text{мм}$ .

Одним из наиболее диффузионно подвижных элементов является водород. Он особенно заметно диффундирует при высоких температурах; однако его заметная диффузия в  $\text{Fe}_\alpha$  наблюдается и при комнатных температурах. Даже при достаточно жестких режимах дуговой сварки к моменту охлаждения металла зоны термического влияния до комнатных температур водород успевает продиффундировать из шва в основной металл примерно на  $1,5$   $\text{мм}$ . В дальнейшем и при обычной температуре он продолжает поступать из перенасыщенных водородом швов в околошовную зону, распространяясь далее в основной металл. В Ленинградском политехническом институте им. М. И. Калинина экспериментами зафиксировано прохождение водорода в основной металл от границы сплавления на  $\sim 3,5$   $\text{мм}$  [6]. По частному сообщению проф. Христенсена при большом количестве водорода в швах он проникает в основной металл на глубину около  $10$   $\text{мм}$ . Правда, для этого требуется значительное время (много более  $10$  суток).

Таким образом, в зависимости от состава металла шва (а следовательно, от состава сварочных материалов, регулирующих состав сварочной ванны и шва) изменяется композиция металла и околошовных зон вблизи границы сплавления и его свойства. В наибольшем объеме металла вблизи границы сплавления и даже в зоне термического влияния может происходить изменение концентрации водорода, вызывающего во многих металлах и сплавах хрупкость.

В ряде случаев для дуговой сварки углеродистых и низколегированных сталей применяются сварочные материалы, дающие швы с аустенитной структурой. Этот прием используется, например, в комбинированных сварных соединениях аустенитная сталь — перлитная сталь или при сварке закаливающихся сталей, для исключения подогрева (если сварка без подогрева сварочными материалами, дающими феррито-перлитные структуры в шве, вызывает трещины). В таких сварных соединениях при

переходе от аустенитного металла шва к нелегированному или низколегированному всегда имеет место зона шва с заметно переменным составом согласно кривой 1 на рис. 1.6. Естественно, что среди получающихся переменных составов вблизи границы сплавления могут образовываться некоторые объемы металла с неблагоприятными свойствами, лимитирующими работоспособность всего соединения.

Так, например, при сварке глубокопрокаливающихся низколегированных сталей аустенитными электродами, дающими наплавленный металл типов Х22Н15 (аналогично Х20Н10Г6), центральные части швов обычно имели

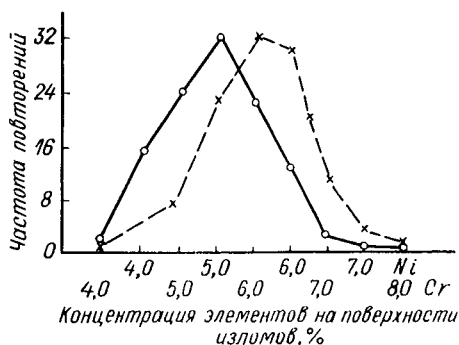


Рис. 1.7. Химический состав на поверхности изломов сварных соединений низколегированных сталей, выполненных ручной сваркой при  $I_{св} = 300$  а электродами, дающими хромоникелевый аустенитный наплавленный металл

в составе 14—16% Cr и 8—12% Ni и обладали весьма хорошей вязкостью. Однако часто такие сварные соединения разрушались по металлу шва вблизи границы сплавления. Исследования, проведенные М. А. Гальпериним, показали, что состав металла на поверхностях разрушения отличается как от состава средних частей шва, так и от основного металла. Его результаты статистического анализа спектральных определений хрома и никеля на поверхностях изломов сварных соединений, выпол-

ненных на одном из режимов ручной сварки, приведены на рис. 1.7. Как следует из результатов такого анализа, наиболее вероятными оказываются разрушения вблизи границы сплавления в зоне металла шва с составом 5—7% Cr и 4—6% Ni [48].

Аналогичное явление наблюдается и при сварке разнородных соединений марганцевистой аустенитной стали с углеродистой или низколегированной при содержании марганца в центральных частях шва около 17—18%. Разрушения таких соединений, по исследованиям А. П. Барышникова, обычно происходят на расстоянии 0,12—0,2 мм от кромки нерасплавившегося при сварке основного металла. Спектральный анализ поверхностей изломов показал, что обычное содержание на них марганца составляет 7—9%, т. е. меньше, чем в центральных частях шва, и больше, чем в основном металле (~1% Mn). Также промежуточным между швом и основным металлом оказался состав металла на изломах по другим элементам [48].

Как показал ряд исследований, такие хрупкие прослойки в металле швов, если они имеют достаточную ширину, сильно снижают работоспособность сварных соединений [54, 29]. При

уменьшении их ширины и для хромоникелевых, и для марганцовистых высоколегированных швов работоспособность сварных соединений повышается. Это дает возможность регулировать свойства таких зон в сварном соединении выбором состава металла шва, т. е., по существу, выбором сварочных материалов (см. § 1.2).

Это положение иллюстрируется рис. 1.8.

Так, при относительно малой степени легирования металла шва  $[X]_{ми}$  (например, Ni в хромоникелевых аустенитных швах или Mn в марганцовистых) зона опасных составов с концентрацией в пределах  $X_{оп}$  оказывается значительно шире ( $C'$ ), чем при более

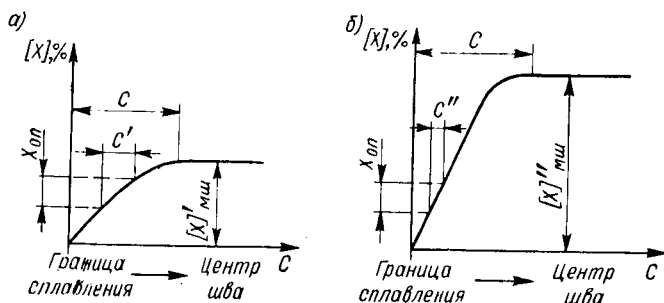


Рис. 1.8. Изменение ширины зоны опасных концентраций легирующего элемента вблизи границы сплавления и при малой (а) и большой (б) степенях легирования металла шва

легированных швах ( $C'' < C'$ ), хотя общая ширина зоны переходных составов ( $C$ ) практически одинакова.

Если имеется возможность без ущерба для свойств металла шва увеличить степень легирования элементом X в наплавленном металле (т. е. принять сварочные материалы, обеспечивающие большее значение  $[X]_{ми}$ , а следовательно, при определенном способе и режиме сварки и  $X_{ми}$ ), то соответственным выбором сварочных материалов может быть обеспечена более высокая работоспособность и этой особой зоны сварных соединений вблизи границы сплавления.

Такое решение в ряде случаев возможно. Так, например, механические свойства металла шва с примерно одинаковым содержанием хрома (15—18%), но различным содержанием никеля (10—30%) практически одинаковы, а свойства металла вблизи зоны сплавления при большей концентрации никеля заметно лучше. Подобно этому в марганцовистых аустенитных швах повышение содержания марганца с 17 до ~30% практически не влияет на механические свойства металла шва, но заметно улучшает работоспособность металла вблизи зоны сплавления.

В некоторых случаях отмечается и несколько иной характер влияния состава металла шва на свойства металла зоны сплавления

ния. Так, например, если при сварке толстолистовой закаливающейся стали электродами, дающими наплавленный металл типа Х20Н10Г6 или Х22Н15, механические свойства центральных частей металла шва подобны, то зона сплавления при применении электродов, дающих металл типа Х20Н10Г6, оказывается хуже. Обычно это связывают с дополнительным тепловым воздействием при выполнении многослойных швов, вызывающих в металле с повышенным содержанием марганца тепловую хрупкость.

Таким образом, применение различных сварочных материалов приводит к изменению состава металла сварочной ванны и сварного шва и влияет на состав и свойства металла в зоне сплавления, улучшая или ухудшая их. Поэтому правильный выбор сварочных материалов оказывает положительное воздействие не только на свойства металла шва, но и зоны сплавления.

Влияние сварочных материалов на свойства зон термического влияния будет отмечено ниже.

### **§ 1.4. Влияние соотношения механических свойств различных зон сварных соединений на их работоспособность в условиях механического нагружения**

Практически для всех сварных соединений характерна та или иная степень различных неоднородностей зон: металла шва, зоны сплавления, участков зоны термического влияния, основного металла, вызываемых как их различием в химическом составе, так и в структуре. В общем случае сварное соединение в направлении, перпендикулярном сварному шву, может рассматриваться как чередование прослоек металла различной толщины с различными свойствами (временным сопротивлением, пределом текучести, твердостью, пластичностью, иногда модулем нормальной упругости), завершающееся зоной эталонного по свойствам основного металла. При этом отдельные прослойки могут быть прочнее основного металла (в некоторых случаях металл шва или какие-то участки зоны термического влияния) или менее прочными (участки разупрочнения в зоне влияния или менее прочный шов). Могут иметь место и более сложные случаи: зона термического влияния прочнее основного металла, а металл шва менее прочен, чем основной металл.

Механические свойства всего сварного соединения в целом — прочность, деформационная способность, энергоемкость, место и характер разрушения — находятся в непосредственной связи с характером и степенью механической неоднородности металла различных зон и участков такого соединения.

Рассмотрим влияние неоднородности свойств в простейшем случае на образце с ограниченным сечением, работающим на растяжение. Пусть в средней части образца имеется «мягкая» зона



(прослойка), т. е. зона с пониженными по отношению к его основной части по длине пределом текучести и временным сопротивлением разрыву (рис. 1.9, а, б). При нагружении такого образца нагрузкой несколько ниже  $P_1$  (рис. 1.9, б) весь образец будет работать упруго, отвечая расчетным схемам работы детали (изделия) под воздействием механической нагрузки. В случае увеличения нагрузки до значения  $P_2$  основная часть образца будет продолжать работать упруго, а на участке его длины  $l_M$  начнут развиваться пластические деформации — может образоваться шейка. При разгрузке образец будет иметь остаточную деформа-

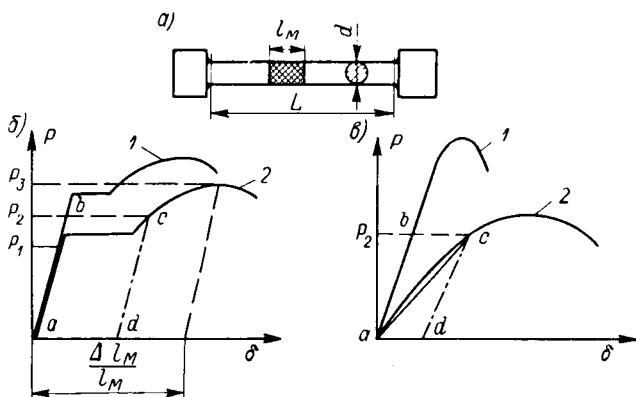


Рис. 1.9. Схема работы образца с мягкой прослойкой (а) при различной прочности, но при одинаковом (б) и различном (в) модуле упругости;

1 — зависимость  $P = f(\delta)$  для основной части образца; 2 — то же для металла «мягкой прослойки»

цию; соответственно деталь (изделие) изменит свою форму по сравнению с начальной.

При последующих нагружениях до напряжений, определяемых нагрузкой  $P \leq P_2$ , весь образец будет работать опять упруго, причем основная часть — согласно линии  $ab$  на кривой 1 (рис. 1.9, б), а металл мягкой прослойки — согласно линии  $cd$ . В ряде случаев при таком состоянии образец (деталь) вполне работоспособен и угрозы его преждевременного разрушения при статической нагрузке нет. Однако, если существуют дополнительные факторы, например действие химически агрессивных сред, возникшие пластические деформации могут привести к понижению работоспособности, при этом усиливается местная коррозия металла, как это иногда имеет место в сварных конструкциях вблизи швов или в швах (при разрушениях, связанных с каустической хрупкостью, и др.).

При дальнейшем нагружении образца до нагрузки  $P_3$  (отвечающей временному сопротивлению  $\sigma_s$  металла мягкой прослойки

при достаточной протяженности ( $l_m$ ) пластическое деформирование будет происходить в основном за счет металла мягкой прослойки. Разрушение произойдет при удлинении, определяемом исчерпанием пластичности мягкой прослойки, и, хотя относительное удлинение ее металла может быть достаточно большим  $\frac{\Delta l_m}{l_m}$ , весь образец получит в целом малую деформацию  $\frac{\Delta l_m}{L}$ , т. е. разрушится при небольших деформациях.

Это показывает на неправильность определения относительного удлинения сварных соединений на стандартных круглых образцах со сварным поперечным швом. Такие испытания являются совершенно нехарактерными для сварных соединений при наличии прослоек металла с заметно отличающимися свойствами и могут проводиться лишь как сравнительные.

Еще более усложняется работа образца, если у мягкой прослойки и у основной части образца отличаются и модули нормальной упругости (рис. 1.9, в). Это, например, может иметь место при аустенитном шве ( $E \approx 1,6 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$ ) в образце из обычной стали ( $E \approx 2,1 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$ ).

Рассмотренный характер разрушения образцов с неодинаковыми свойствами металла по длине образца привел к развитию расчетных схем применительно к прочности наиболее слабой прослойки — слабого звена соединения. Однако следует отметить, что такой подход является упрощенным, не позволяющим в ряде случаев использовать полностью резервы прочности таких соединений.

В действительности соединения редко работают согласно рассмотренной схеме. Практически в ряде случаев свободная деформация слабого звена — мягкой прослойки оказывается затрудненной вследствие возникновения в ней при нагружении более сложного напряженного двухосного или трехосного состояния. Это изменяет и условия совместной работы изделий с участками металла с различными свойствами.

Рассмотрим снова образец согласно рис. 1.9, а, но с меняющейся величиной  $l_m$ , а следовательно, отношения  $\kappa = \frac{l_m}{d}$ . В случае уменьшения  $l_m \left( \frac{l_m}{d} \right)$  свободное пластическое течение, например при нагрузке  $P_2$ , затрудняется, шейка не может развиваться, напряженное состояние усложняется и предел текучести металла мягкой прослойки возрастает. Если прочность металла этой прослойки  $\sigma_{отр}^m$  на отрыв достаточна для включения в деформацию более прочного металла остальной части образца, где-то вне прослойки начнет развиваться шейка, и общая прочность образца будет возрастать от  $\sigma_s^m$  до  $\sigma_s^r$ , т. е. до значения прочности более прочной основной части образца. При этом происходит так называемое контактное упрочнение мягкой прослойки.

Общий характер изменения прочности, удлинения и других характеристик при линейном растяжении стальных образцов с мягкой прослойкой от относительного размера прослойки в компактных сечениях приведен по данным О. А. Бакши на рис. 1.10.

Аналогично изменяются и характеристики прочности стыков пластин с развитым сечением (например, при ширине образца  $B$  больше пятикратной толщины пластины листа  $\delta$ ), однако с несколько иными количественными показателями.

В общем случае на свойства прослоек в сварных соединениях влияют как применяемые сварочные материалы, так и технологические приемы и режимы сварки. Не рассматривая здесь влияния

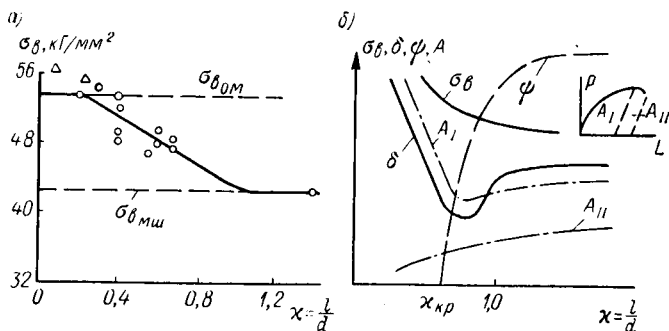


Рис. 1.10. Влияние относительной ширины мягкой прослойки в образце с компактным сечением на изменение его прочности при статическом испытании (а) и изменение прочности, пластичности и работы до начала разрушения (б)

режимов сварки, приводящих к изменению структуры и свойств как металла зоны термического влияния, так и металла швов и зоны сплавления, остановимся на влиянии сварочных материалов на образование механически неоднородных прослоек в сварных соединениях.

Как указывалось выше (§ 1.2), применяемые сварочные материалы, определяющие состав наплавленного металла, а тем самым и металла швов, обеспечивают и определенные их свойства. В ряде случаев механическая прочность металла швов может быть ниже прочности основного металла и зоны термического влияния. Тогда шов будет слабым звеном сварного соединения.

Для решения задачи получения необходимой статической прочности сварных соединений возможны следующие пути.

1. Повышение прочности металла шва до величины, сопоставимой с прочностью основного металла, которое достигается подбором соответствующих сварочных материалов и режимов сварки.

2. Увеличение сечения швов по сравнению с сечением основного металла; при этом допускается использование сварочных материалов, которые дают шов с несколько меньшими прочност-

ными свойствами, чем основной металл, позволяющими при ограниченном по величине «усилении» достигать статической равнопрочности. В ряде случаев необходимо подбирать сварочные материалы, дающие металл швов, наиболее слабо охрупчивающийся от воздействия внешних охрупчивающих факторов, в первую очередь концентраторов напряжений, вызываемых, например, резким изменением сечения в места перехода усиления шва к основному металлу.

3. Изменение конструктивной формы швов (разделка под сварку), позволяющее выполнить доброкачественную сварку с получением относительного уменьшения ширины слабой зоны и реализации при этом контактного упрочнения; в этом случае сварочные материалы должны обеспечить получение в неусиленных швах свойств металла, сохраняющего работоспособность в условиях усложненного напряженного состояния (надлежащее значение  $\sigma_{отр}$ , деформационной способности и др.).

Таким образом, влияя на свойства металла шва, сварочные материалы влияют и на общие свойства сварных соединений.

Однако возможен и другой характер влияния сварочных материалов на свойства соединений.

Так, например, известен ряд случаев, когда сварка вызывает разупрочнение основного металла в зоне термического влияния. Особенно часто разупрочнение наблюдается в области с наиболее высокой температурой металла, вблизи границы сплавления (нагрев до подсолидусных температур). Влияние термдеформационного цикла сварки, создавая те или иные несовершенства в строении металла этой зоны, приводит иногда не только к понижению прочностных характеристик, но и к снижению его деформационной способности. Наличие такой ослабленной зоны с пониженной деформационной способностью представляет определенную опасность в условиях эксплуатации сварных соединений. В качестве примера можно указать на сварные соединения трубопроводов, работающих при достаточно высоких температурах ( $\sim 600^\circ\text{C}$ ) в условиях значительных нагрузок, определяемых внутренним давлением, и термических напряжений, в частности, вызывающих изгиб труб. Работа металла в условиях ползучести хотя также подчиняется влиянию рассмотренного выше контактного упрочнения, но оказывается весьма чувствительной к неравномерности распределения деформаций. Ослабленная даже узкая зона основного металла, заключенная между более прочным швом и неослабленным основным металлом, воспринимая основные деформации, вызывает начальные межзеренные разрушения, которые, развиваясь на расстоянии одного-трех зерен от границы сплавления, приводят к так называемым локальным околошовным разрушениям. Хотя значительного повышения работоспособности таких соединений добиваются последующей после сварки высокотемпературной термической обработкой (типа аустенитизации в случае аустенитных трубопроводов), однако и в этом случае

выбор сварочных материалов может быть весьма важным. Так, если достигнуть в металле шва снижения прочностных свойств (в частности, предела текучести при температурах эксплуатации) до значений, сопоставимых с пределом текучести металла околошовной зоны при достаточной пластичности шва, то он будет воспринимать основную часть деформаций, разгружая тем самым опасную для локальных разрушений зону перегретого при сварке основного металла. Это несколько снижает длительную прочность всего сварного соединения в целом, что может быть учтено выбором соответствующей толщины труб и шва, но повышает надежность сварных конструкций в сложных эксплуатационных условиях.

В ряде случаев важным является выбор сварочных материалов для сварных соединений, где в результате термомодеформационного цикла сварочной операции в зоне термического влияния получаются неравновесные структуры, характеризующиеся хрупкостью, заметным снижением деформационной способности. Так, при сварке углеродистых (с повышенным содержанием углерода), низко- и среднелегированных сталей в закаленных участках зоны термического влияния уже при изготовлении сварных конструкций образуются трещины. Такие трещины, вызываемые полем напряжений 1-го рода (в объемах, сопоставимых со всей рассматриваемой зоной металла конструкции) и 2-го рода (структурных, развивающихся в зонах, сопоставимых с отдельным зерном или группой зерен металла), связаны с развитием задержанного разрушения при недостаточной деформационной способности металла и усиливаются влиянием водорода, который вызывает охрупчивание и в ряде случаев может стать основной причиной появления холодных трещин. В связи с этим, когда не удается предотвратить подкалку околошовных зон доступными и целесообразными технологическими средствами или своевременным их отпуском при сварке или после нее, возможно посредством выбора сварочных материалов ограничить или исключить образование холодных трещин в швах и околошовных зонах. Это достигается как снижением содержания водорода в металле швов и ограничением его распространения в околошовных зонах, так в некоторой степени изменением поля напряжений вследствие различных температурных интервалов объемных изменений металла шва при охлаждении (как за счет различия температурных коэффициентов расширения, так и за счет температурных интервалов полиморфных превращений, сопровождающихся изменением удельных объемов [40]).

В качестве критерия влияния количества водорода в наплавленном металле, формирующем основную долю металла шва, как при ферритных (низколегированных), так и аустенитных

электродах, принята минимальная нагрузка  $P_{\text{кр}}^{\text{г}}$ , вызывающая задержание разрушения зоны около границы сплавления при испытаниях специальных образцов на изгиб. По результатам И. В. Боровушкина [7], такая зависимость приведена на рис.

1.11, а. В качестве основного металла применялась среднелегированная сталь с пределом текучести около  $80 \text{ кг/мм}^2$ . Влияние на  $P_{\text{min}}^{\tau_{\text{кр}}}$  пересчитанного по приближенным методам количества водорода, прошедшего из шва в околошовную зону  $H_{\text{ошз}}$ , показано на рис. 1.11, б [51]. Из этих и ряда других исследований и производственного опыта следует, что снижение водорода в металлах швов применением ферритных электродов без органических составляющих покрытия (с фтористокальциевым покрытием) и

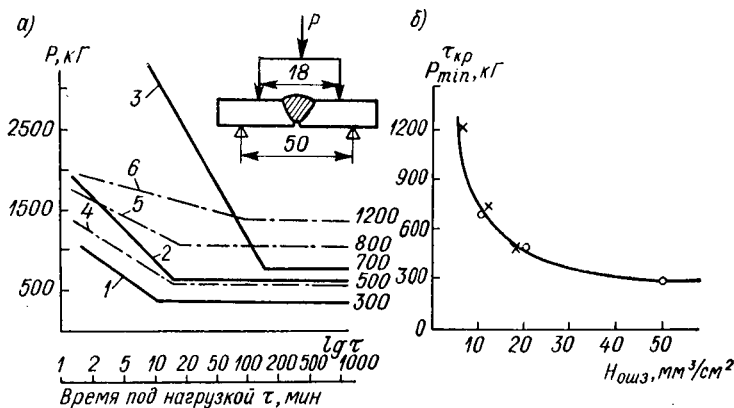


Рис. 1.11. Влияние концентрации водорода в наплавленном металле на сопротивляемость стыка с надрезом статическому изгибу: а — для ферритного (кривые 1, 2, 3) и аустенитного (кривые 4, 5, 6) шва при различных концентрациях водорода в наплавленном металле; б — обобщение для ферритных и аустенитных швов по общему количеству водорода, перешедшего из шва в околошовную зону,  $H_{\text{ошз}}$

прошедших сушку, максимально исключая воду из покрытия (низководородистых электродов), является весьма важным как для снижения вероятности появления трещин в сварных соединениях при изготовлении конструкций из подкаливающихся сталей, так и повышения их эксплуатационной надежности. Также с этих позиций полезно и применение аустенитных швов, ограниченно отдающих водород в околошовные зоны. Однако и в этом случае полезно добиваться снижения водорода в наплавленном металле такими электродами (повышением температуры прокали электродов, в наиболее сложных случаях использованием электродных стержней, обезводороженных предварительной вакуумной термической обработкой). Влияние снижения количества водорода в аустенитных швах на повышение сопротивления задержанным разрушениям сварных соединений закаливающихся при сварке сталей типа 30ХЗНЗ и 30ГСМ, по экспериментам И. В. Боровушкина, показано на рис. 1.12.

Таким образом, для улучшения характеристик металла околошовной подкаленной зоны в рассмотренных случаях положитель-

ным являлось применение аустенитных сварочных материалов или низководородных ферритных электродов с фтористокальциевым покрытием.

Однако в сварных соединениях сталей, относительно малочувствительных к водороду (например, обычных нелегированных малоуглеродистых сталей), работающих в условиях знакопеременных нагрузок, важнее оказывается сопротивление усталости. В этом случае чрезвычайно опасен концентратор в месте перехода металла шва к основному металлу, особенно для угловых швов. Известно, что плавность такого перехода зависит и от типа электродного покрытия и электроды с фтористокальциевым покрытием дают этот переход менее плавным, чем электроды с покрытием рутилового типа. Поэтому, если дополнительная механическая обработка мест перехода металла шва к основному металлу исключена или весьма затруднительна, рекомендуется производить сварку электродами с рутиловым покрытием, так как усталостная прочность таких соединений выше, чем соединений, полученных сваркой электродами с фтористокальциевым покрытием.

Эти примеры показывают влияние выбора сварочных материалов на свойства металла зон сплавления, термического влияния сварных соединений и некоторые их рабочие характеристики.

### § 1.5. Влияние соотношения составов основного металла и металла швов на некоторые особые служебные характеристики сварных соединений

При сварке многих конструкций от сварных соединений требуется не только прочность, но и достаточная коррозионная стойкость. Так, например, коррозионная стойкость в морской воде необходима для всех корпусов кораблей. Условия эксплуатации различных сварных конструкций в химических производствах требуют сопротивляемости сварных соединений различным видам коррозии от воздействия весьма разнообразных химических веществ.

Коррозия в сварных соединениях различных металлов и сплавов может быть общая и межкристаллитная (структурная). По характеру воздействующих реагентов различают коррозию жидкостную и газовую, причем первая встречается чаще.

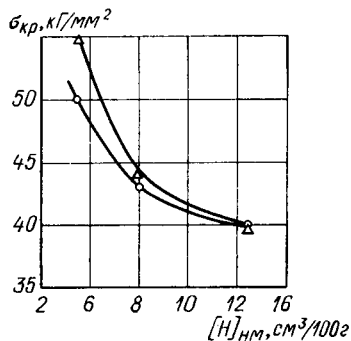


Рис. 1.12. Влияние количества водорода в аустенитном шве на снижение сопротивляемости замедленному разрушению закаливаемых при сварке сталей: Δ—сталь 30ХЗНЗ; ○—сталь 30ГСМ

Общая коррозия может быть равномерной, т. е. характеризующейся примерно одинаковой скоростью разрушения и швов, и основного металла, или сосредоточенной, предпочтительно развивающейся либо в шве, либо в зоне термического влияния, либо в основном металле. При этом скорость коррозионного разрушения шва меньшая, чем скорость разрушения зоны термического влияния или основного металла, не может в ряде случаев считаться хорошим показателем, так как возможно, что именно наличие шва может интенсифицировать коррозию основного металла.

В связи с тем, что корродирование в значительной степени зависит от соотношения электрохимических потенциалов, а неоднородность химического состава и структуры различных зон сварных соединений создает различие их электрохимических потенциалов, это может вызвать преимущественное корродирование какой-то зоны соединения.

Так в сварных соединениях углеродистых и низколегированных корпусных сталей, выполненных с использованием обычных сварочных материалов (электроды типа УОНИ-45 при ручной сварке; электродная проволока Св-08А в сочетании с флюсом ОСЦ-45 при сварке под флюсом), в морской воде быстрее корродирует металл швов. Легирование металла швов хромом в пределах более 0,25% в случае, если основным металлом является сталь Ст.4, или более 1,4%, если применена корпусная сталь 10ХСНД, приводит к локализации коррозии (типа ножевой) в околошовной зоне. Легирование металла швов никелем в пределах около 0,5—1,0% снижает общее коррозионное разрушение. Однако для стали марки 09Г2 или 09Г2С в этом случае при некоторых режимах сварки наблюдается ускоренная коррозия зоны термического влияния, хотя в сварных соединениях некоторых других марок стали этого явления не замечается. Такой характер коррозии имел место в сварных соединениях ледокола «Киев» финской постройки, что потребовало большого объема ремонтных работ даже после непродолжительного срока его эксплуатации.

Некоторое представление о характере влияния легирования швов на развитие коррозии в сварных соединениях корпусных сталей приведено в виде профилограмм поверхностей после 750 ч испытания (рис. 1.13).

Сосредоточенная ножевая коррозия как вблизи границы сплавления, так и на некотором удалении от шва имеет место и в ряде сварных соединений нержавеющей сталей, причем она развивается, утоньшая металл, в десятки и сотни раз быстрее, чем в аналогичных средах равномерная коррозия основного металла.

Как следует из анализа таких коррозионных разрушений, подбор сварочных материалов может радикально изменять скорость коррозионных разрушений в различных зонах простых и специально легированных сталей.

Межкристаллитная коррозия, представляющая собой разрушение металлических связей между кристаллитами, по их границам,



также является одним из опасных видов снижения эксплуатационных характеристик сварных соединений, например в конструкциях из аустенитных хромоникелевых сталей. При этом исключение или ослабление склонности к межкристаллитной коррозии в результате сварки достигается соответствующим выбором основного металла конструкции, сварочных материалов, обеспечива-

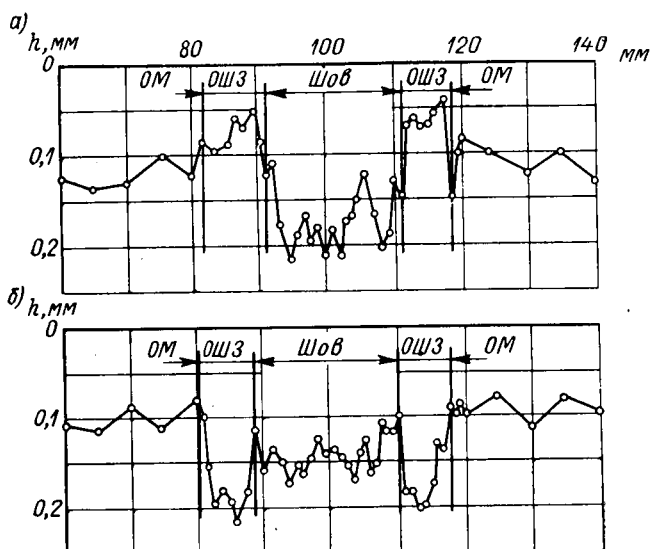


Рис. 1.13. Влияние состава металла шва на развитие коррозии сварного соединения: а — шов корродирует сильнее зоны термического влияния и основного металла; б — корродирует больше зона термического влияния (при другом составе металла шва)

ющих необходимый состав металла швов, сварочных режимов и иногда последующей термической обработки (пассивации). В связи с наличием по этим вопросам большого объема специальной литературы отметим здесь только важность и в этом отношении соответствующего выбора сварочных материалов.

Весьма целесообразными применительно к различным эксплуатационным условиям являются сварные конструкции из разнородных материалов, в частности сталей. Сварка при этом должна обеспечивать монолитность соединений сталей различного состава, классов или вообще разнородных металлов. Сварные швы в этом случае либо подобны металлу одного из таких разнородных элементов (и, следовательно, различие составов и свойств локализуется на границе сплавления металла шва с металлом другого элемента конструкции), либо отличаются от обоих и по обеим своим границам сплавления имеют резкие переходы состава и свойств. Естественно, что для выбора сварочных материалов в таких

случаях приходится решать дополнительно ряд сложных задач. Одной из них, например для случая эксплуатации соединений при меняющихся температурах, является учет совместной работы шва и основного металла с переменным коэффициентом теплового расширения у границы сплавления. В связи с различием величин этих коэффициентов по границе сплавления и в прилегающих объемах шва и основного металла при нагревах и охлаждениях возникают напряжения и развиваются пластические деформации, тем большие, чем больше различие в значениях коэффициентов тепловых расширений. Разрушения таких соединений происходят в результате термоциклической усталости и в значительной степени зависят от соотношений химических составов шва и основного металла.

Усредненные значения коэффициентов теплового расширения сталей и сплавов на никелевой основе приведены в табл. I.1.

Т а б л и ц а I.1

**Коэффициенты теплового расширения различных сталей и сплавов на никелевой основе**

Структурный класс	Марка стали и тип легирования металла шва	$\alpha \cdot 10^6$ в интервале температур в °С			
		20—200	20—400	20—600	20—700
Феррито-перлитный	СТ-20, 15ХМ, 12Х1МФ, 34ХН3МФ, Э42А	11,4—12,6	12,8—13,7	13,6—14,4	13,8—13,9
Ферритный и феррито-мартенситный	1Х13, Х17Н2, 18Х11МБФ, ЭФ-13	10,3—10,5	11,0—11,6	11,5—12,4	~12,0
Аустенитный	Х18Н10Т, Х23Н18, Х16Н13М2Б, Х13Н35В3Т, ЭА1-М2Б, ЭА-3М6	14,6—17,0	15,4—17,5	16,0—18,2	17,8—18,6
Феррито-аустенитный	Х25Н5ТМФ, ЭАФ-1МФ	13,2—14,0	14,0—14,8	—	—
На никелевой основе	Х16Н80ТНЮ, Х15Н60М7	~12,1	12,7—14,0	13,6—14,9	~15,6

Различие почти в 1,5 раза значений термического коэффициента расширения аустенита и феррито-перлитных сталей приводит к развитию значительных пластических деформаций в разнородных сварных соединениях при теплосменах и к снижению в связи с этим ряда эксплуатационных характеристик. Меньшая разница в этих коэффициентах у феррито-перлитных сталей и сплавов на никелевой основе позволяет получать более стабильное качество сварных соединений. Например, во время испытаний на длитель-

ную прочность с циклическим изменением температуры сварные соединения со швами на никелевой основе показали более высокие результаты, чем соединения со швами на железной основе (рис. 1.14). С повышением температуры хрупкие разрушения сварных соединений с аустенитными швами происходят заметно раньше, чем соединений со швами на никелевой основе. Так, при швах типа X16H25H6 они возникали после 19—25 циклов (нагрев в течение 1 ч, затем выдержка при 580—650° С 6 ч, и после этого охла-

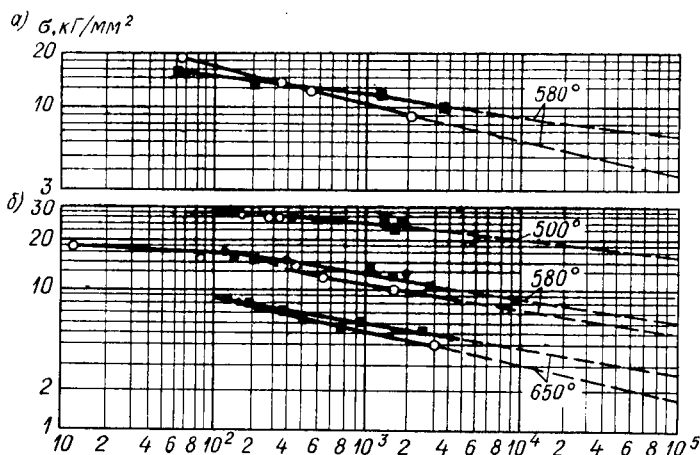


Рис. 1.14. Длительная прочность сварных соединений стали 12X1HФ с аустенитными швами различного состава при циклически изменяющейся температуре: а — первая плавка стали; б — вторая плавка стали;

■ — электроды X15H60M7; ○ — электроды X15H25M6 (после сварки отпуски 700° С — 5 ч)

ждение до 50° С в течение 1 ч), т. е. через 150—200 ч испытания, а при швах на никелевой основе типа X15H60M7 они образовывались через 160—200 циклов (1300—1700 ч испытаний). При этом соединения имели большую пластичность, хотя разрушения локализовались вблизи границы сплавления [29].

Известны аналогичные результаты, показывающие снижение характеристик сварных соединений перлитных сталей, выполненных аустенитными швами типа X18H9Б, после циклических испытаний в сравнении с испытаниями при постоянной температуре [85], а также значительно большее время для разрушений и количество циклов, выдерживаемое соединениями со швами на базе никелевых сплавов X10H50Б2 и X15H70Б2 при максимальной температуре в цикле 593° С и различной длительности каждого цикла [85, 81].

В связи с этим в ряде случаев является целесообразным выполнять швы в таких разнородных соединениях, работающих в условиях теплосмен, сварочными материалами, дающими металл шва в виде сплава на никелевой основе, или же осуществлять

«прослойку» никелевого сплава между перлитной сталью и основным аустенитным швом. Такие прослойки обычно создаются предварительной наплавкой кромок специальными сварочными материалами, в частности электродами.

В разнородных сварных соединениях, особенно подвергающихся после сварки термической обработке или эксплуатирующихся при повышенных температурах, в ряде случаев вблизи границ сплавления шва с отличающимся по составу основным металлом появляются особые зоны в виде прослоек, возникающие в результате диффузионных процессов. Наиболее часто они образуются за счет диффузии углерода, как одного из наиболее подвижных элементов в железных сплавах. В результате того, что при различных составах металлов шва и околосшовной зоны может иметь место различие соотношения связанного углерода (в карбидах) и остающегося в растворе концентраций растворенного углерода, это приводит к перемещениям — миграции углерода из металла с меньшим количеством сильных карбидообразователей в металл с большим их количеством. В результате с одной стороны границы сплавления образуется обезуглероженная прослойка, а с другой стороны — карбидная гряда. Такие диффузионные прослойки могут в значительной степени изменять и свойства сварных соединений.

При работе таких соединений, например на кручение, обычно разрушения проходят по обезуглероженной прослойке. В случае работы на изгиб деформационную способность лимитирует металл карбидной гряды, по которой развивается трещина, хотя иногда разрушение проходит и по границе обезуглероженной и науглероженной зон.

Как следует из самой схемы образования таких диффузионных прослоек [54], они развиваются во времени и интенсивность их развития определяется соотношением составов основного металла и металла шва, а также температурой, при которой находится сварное соединение.

Например, в сварных соединениях углеродистых сталей, выполненных хромоникелевыми аустенитными швами, обезуглероженная и карбидная прослойки развиваются очень интенсивно. По мере увеличения содержания никеля в таких швах при постоянном составе основного металла повышается минимальная температура, при которой появляются прослойки, уменьшается степень снижения концентрации углерода в обезуглероженной зоне, снижается интенсивность развития прослоек по ширине в случае воздействия одинаковых температур. В качестве примера на рис. 1.15 [32] показано влияние содержания никеля в наплавляемом металле (доля участия в шве основного металла  $\psi \approx 0,35$ ) при постоянном содержании хрома ( $\sim 15\%$ ) на развитие прослоек.

При достаточно длительной выдержке таких разнородных соединений в режиме повышенных температур прослойки могут развиваться по ширине не только в долях, но и в целых миллиметрах,

что в значительной степени сказывается на эксплуатационных характеристиках сварных соединений. Однако даже в многослойных швах в результате воздействия нагревов, вызываемых наложением последующих слоев шва (валиков), возможно появление слабо развившихся диффузионных прослоек [48].

Одним из наиболее распространенных способов борьбы с появлением таких прослоек является совместный подбор составов

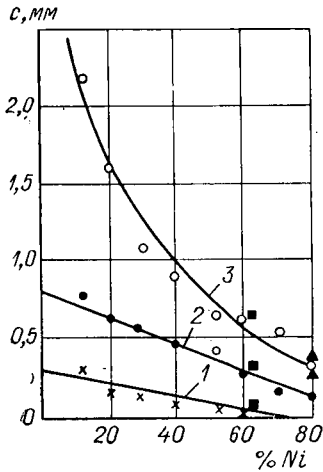


Рис. 1.15. Влияние содержания никеля в металле швов на развитие ширины обезуглероженной прослойки в углеродистой стали при различных температурах старения:

1 — после выдержки 1000 ч при 450° С; 2 — то же, 550° С; 3 — то же, 650° С

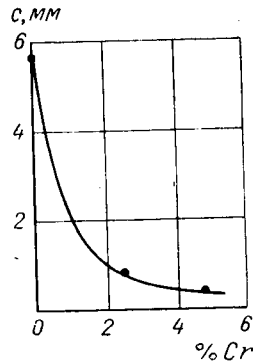


Рис. 1.16. Влияние развития ширины обезуглероженной прослойки в основном металле с различным содержанием хрома в течение  $10^5$  ч при  $\sim 540^\circ$  С; концентрация хрома в шве 14%; содержание углерода в основном металле и в металле шва 0,10—0,15%

основного металла и швов с таким соотношением сильных карбидообразующих элементов и углерода в каждой из составляющих сварного соединения, которые исключают или весьма заметно ограничивают развитие реактивной диффузии углерода через границу сплавления. На рис. 1.16 показано влияние изменения концентрации хрома на развитие обезуглероженных (а следовательно, и карбидных) прослоек за  $10^5$  ч [29] при воздействии температуры  $\sim 540^\circ$  С.

В ряде случаев, если основной металл выбран неправильно, оказывается возможным предупредить образование прослоек предварительной наплавкой на его кромки другого металла (облицовка кромок), создающего барьер с промежуточными характеристиками развития реактивной диффузии углерода по обеим границам: наплавка — основной металл и наплавка — основной шов.

Таким образом, и в случаях выполнения разнородных сварных соединений выбор сварочных материалов является средством регулирования их свойств, хотя изменения свойств проявляются обычно не сразу, а только после некоторого периода эксплуатации сварных конструкций.

## § 1.6. Связь свойств наплавленных слоев с выбором сварочных материалов

В ряде случаев условия эксплуатации для поверхностных слоев значительно отличаются от условий эксплуатации всего остального материала изделия. Так, например, кроме обеспечения общей прочности, что определяется свойствами металла и сечением деталей, часто поверхностный слой должен работать на абразивный или абразивно-ударный износ (направляющие станин, зубья ковшей землеройных орудий, некоторые поверхности рельсов, желоба валков канатно-подъемных устройств и др.). Для некоторых поверхностей условия работы дополнительно усложняются повышенной температурой, эрозивно-коррозионным воздействием окружающей среды и др. (например, клапаны двигателей, уплотнительные поверхности задвижек). Часто поверхности испытывают коррозионное воздействие среды: морской воды, различных реагентов в химических производствах и пр.

Получение достаточно работоспособных и одновременно экономически целесообразных изделий и деталей в таких случаях осуществляется различными приемами: выбором материала изделия, в частности различных биметаллов (малоуглеродистая сталь + нержавеющая; сталь + томпак; сталь + титан и др.), поверхностной термообработкой (газопламенной или высокочастотной поверхностной закалкой) или другими видами поверхностного упрочнения (электроискровым и др.); нанесением тонких поверхностных слоев (металлизация, напыление, гальванические покрытия); наплавкой значительных слоев на поверхность.

Процессы наплавки занимают одно из важных мест в современной сварочной технике не только при ремонте и восстановлении первоначальных размеров и свойств деталей. При изготовлении деталей на их поверхности наплавкой наносят слои металлов специальных, наиболее целесообразных составов, обладающих износостойкостью, жароупорностью, кислотостойкостью и пр.

В ряде случаев для изготовления детали вместо дорогостоящих металлов и сплавов могут применяться дешевые металлы (например, малоуглеродистая сталь или сталь специальных свойств) с наплавкой из металла того специфического состава, который будет обеспечивать необходимые рабочие характеристики изделия (замена бронзовых изделий стальными с бронзовой наплавкой; изделий из высоколегированных сталей изделиями из углеродистых сталей с высоколегированной наплавкой и пр.). Обычно такие конструкции более экономичны, чем конструкции,

изготовленные целиком из одного дорогостоящего металла, а в ряде случаев более надежны в эксплуатации.

При выполнении наплавки со специальными свойствами, отличающимися от свойств основного металла изделия, приходится учитывать ряд обстоятельств. Так, наличие в составе наплавки (например, сплава на медной основе) составляющих основного металла (железа) значительно снижает рабочие характеристики поверхностного слоя. Максимальное снижение доли основного металла в наплавленном слое, как правило, является одной из основных задач при выполнении наплавочных работ, хотя при этом следует обеспечивать необходимую надежность связи наплавки с основным металлом, что во многих случаях определяется достаточным проплавлением наплавляемой поверхности.

Составляющие металла наплавки и основной металл могут образовывать химические соединения, снижающие прочность соединения наплавленного слоя с основой. Например, наплавка титана на железные сплавы всегда приводит к появлению слоя хрупких интерметаллидов, снижающих прочность связи наплавки с основным металлом. Интерметаллидные прослойки такого типа образуются уже в процессе наплавки, особенно в зоне переменного состава — вблизи границы сплавления, либо за счет диффузионных процессов при длительном нагреве (например, при наплавке изделия с предварительным нагревом) и от последующих нагревов в многослойных наплавках, либо при термической обработке, а также при эксплуатации наплавленных изделий при повышенных температурах. В некоторых случаях интерметаллиды образуются очень быстро. Так, при сварке взрывом соединения сталь—титан участки таких интерметаллидов в месте соединения обнаруживаются иногда даже без последующих нагревов.

В связи с тем, что некоторые необходимые эксплуатационные свойства, например сопротивление абразивному износу, определенным образом связаны с повышением твердости металла, многие наплавочные сплавы малопластичны и могут образовывать в наплавленных слоях трещины. Этому способствует не только затрудненность тепловых сокращений при охлаждении металла от расплавленного состояния до комнатных температур, но и обычно имеющее место различие коэффициентов линейного расширения наплавки и основного металла.

В связи с тем, что в однослойных наплавках обычно не удается избежать такого количества составляющих основного металла, которые не ухудшали бы иногда недопустимо свойств наплавленной поверхности, приходится применять многослойные наплавки. Так, например, при дуговой наплавке легированных сплавов на железной и никелевой основе плавящейся электродной проволокой под флюсом в первом слое доля основного металла обычно составляет 50—65%. Состав наплавленного слоя, близкий к составу электродной проволоки, в этом случае может быть получен только при пяти-, семислойной наплавке. При замене проволоки

металлической лентой соответствующих размеров (соотношения ширины и толщины) в связи с изменяющимся характером плавления ленты дугой, перемещающейся по ее торцу, доля основного металла в наплавленном первом слое снижается до 8—15%. Тогда желаемый состав может быть получен примерно во втором слое наплавки.

Иногда многослойность наплавки определяется и работоспособностью границы сплавления. Например, чтобы обладать коррозионной стойкостью, наплавка должна иметь состав типа Х18Н10В; однако при сплавлении такого металла с малоуглеродистой или низколегированной сталью в зоне неполного перемешивания образуется заметная по величине хрупкая прослойка (см. рис. 1.8), часто приводящая к отколам. Поэтому на основной металл сначала наплавляют слой более аустенизированного металла (для обеспечения свойств зоны сплавления с основным металлом), а затем, вторым или третьим слоем, обеспечивают наплавке необходимую коррозионную стойкость.

Подслои (первые слои) могут применяться и для исключения образования прослоек хрупких интерметаллидов.

В связи с весьма разнообразными требованиями к служебным характеристикам наплавов в практике применяются и весьма различные по составу наплавочные материалы. Рассмотрим наиболее типичные из них [68].

Для восстановления размеров различных изделий (например, слабонагруженных деталей машин, крановых колес, шпинделей, муфт и пр.) часто применяются в качестве наплавочных материалов углеродистые и низколегированные стали, такие, как О8Г, 15Г2С, 15ХГ2С, 25Х3 (табл. 1.2).

Для этой группы наплавочных материалов весьма характерна зависимость их свойств от режима наплавки (скоростей охлаждения) и последующей термической обработки.

Для наплавки поверхностей, контактирующих с абразивами, и для режущих кромок применяются более легированные стали и чугуны, например У10ХЗГМ и У30 (табл. 1.2). Для этих составов скорость охлаждения после наплавки сказывается на их твердости в меньшей степени. Необходимое смягчение для механической обработки наплавленной поверхности в размер, например для состава У10ХЗГМ, достигается отпуском или отжигом. Последующая закалка снова повышает твердость.

Пластичность такого наплавленного материала, как чугун типа У30, очень мала, и обычно в наплавленном слое имеются волосные трещины. Подобные материалы могут применяться для наплавки на транспортерах горнорудных предприятий, рабочих органах землеройных и сельскохозяйственных машин, где наличие волосных трещин допускается.

Приведенный в таблице сплав У37Г6Х3 также представляет собой чугун, легированный марганцем и хромом. Он известен под названием ВИСХОМ-9. В связи с большой хрупкостью он



**Углеродистые и низколегированные стали и чугуны,  
применяемые для наплавки в деталях машин**

Марка	Средний химический состав в %					Твердость после наплавки	
	C	Si	Mn	Cr	Mo	ВН	НRC
08Г	0,08	0,4	1,0	—	—	160—200	—
15Г2С	0,15	0,8	1,8	—	—	180—240	—
15ХГ2С	0,15	1,2	1,7	0,7	—	220—300	—
25ХЗ	0,25	0,4	0,8	3,0	—	300—380	—
У10ХЗГМ	1,00	0,25	1,5	3,0	1,0	—	48—62
У30	3,00	1,0	0,5	—	—	—	40—50
У37Г6ХЗ	2,5—3,8	0,5	4—6,5	2,0—4,5	—	—	52—56

не может быть изготовлен ни в виде проволоки (как сплавы 08Г, 15Г2С, 15ХГ2С, 25ХЗ, У10ХЗГМ), ни в виде ленты (сплав У30), а только в виде крупки. Крупка, наносимая на поверхность под наплавку, далее сплавляется с ней сварочными источниками тепла (дуга неплавящегося электрода, газосварочное пламя). Сплав ВИСХОМ-9 применяется для наплавки на лемеха, отвалы плугов и других землеобрабатывающих деталей. Это повышает их износостойкость в 3—5 раз по сравнению с ненаплавленными деталями из конструкционных сталей.

Весьма важную роль среди наплавочных материалов имеют сплавы железа, никеля и кобальта со значительными количествами хрома. В таких сплавах хром увеличивает жароупорность, жаропрочность, коррозионную стойкость, а в определенных соотношениях с другими элементами, благодаря большому родству с углеродом, образует устойчивые карбиды.

Некоторые высокохромистые стали с различным содержанием углерода и высокохромистые чугуны, применяемые для наплавки, приведены в табл. 1.3. К ним относятся 1Х13, 3Х13, 5Х9С3, Х12ВФ, Х13Н4 и У30Х28Н4С4.

Структура и твердость низко- и среднеуглеродистых высокохромистых сталей в значительной степени зависит от скорости охлаждения после наплавки и режима термической обработки (обычно отжиг с последующей закалкой и отпуском). При отсутствии отжига доводка наплавленных деталей до необходимых размеров осуществляется шлифовкой или электроэрозионной обработкой.

Сталь типа 1Х13 используется как жаростойкая для наплавки уплотнительных поверхностей котельной арматуры с температурой пара до 400° С, а также как коррозионностойкая (для

задвижек, работающих в морской воде, и др.). Такие наплавленные поверхности удовлетворительно работают на износ при трении со смазкой (коленчатые валы быстроходных двигателей и другие детали машин).

На абразивный износ (опорные ролики и натяжные колеса гусеничных тракторов, и пр.) лучше работают сплавы типа 3Х13.

Сплавы типа силхромов (5Х9С3) окалиностойки и теплоустойчивы. Они используются в деталях печного оборудования, для ножей, ножиц горячей резки металлов и др., обеспечивая в 3—4 раза бóльшую стойкость, чем ножи из углеродистой стали.

Высокоуглеродистые стали с 11,5—13% Сг, имея структуру ледобурита (остаточного аустенита), упрочняемого при наклепе, и карбидов хрома обладают высокой износостойкостью. Твердость при наплавке без подогрева ниже, чем при наплавке с подогревом до 500° С (для исключения трещин [57]) и замедленным охлаждением с печью, в связи с уменьшением во втором случае количества остаточного аустенита. Отжиг на перлитную структуру для обработки режущим инструментом должен проводиться со ступенчатым охлаждением после выдержки при 900° С [68].

Стали типа Х12 применяются для наплавки гибочных роликов, тормозных шкивов, штампов холодной штамповки, в деталях, где требуется высокая стойкость против абразивного износа при обычных и повышенных температурах.

Введение никеля (сплав Х13Н4, табл. 1.3) исключает возможность отжига, и наплавленные таким сплавом детали (билы молотковых мельниц, зубья ковшей экскаваторов и др.) обычно подвергают обработке шлифованием. Такие детали хорошо работают при сочетании абразивного износа с ударными нагрузками.

Высокохромистые чугуны У30Х28Н4С4 и У35Х20РТ (табл. 1.3) обладают окалиностойкостью и имеют высокую твердость не только при комнатных, но и при достаточно высоких (до 550—650° С) температурах. Однако такой сплав, например, как У35Х20РТ, хрупок, плохо работает на абразивный износ с ударами. Он применяется для наплавки лопаток дымососов, деталей землесосов и других деталей, которые не подвергаются значительным ударам.

Сплав У30Х28Н4С4 (сормайт № 1) обладает несколько повышенной вязкостью и используется для наплавки челюстей грейферов, ножей бульдозеров, клапанов доменных печей, т. е. для деталей, работающих на абразивный износ при нормальных и повышенных температурах и умеренных ударах.

Хромоникелевые аустенитные и аустенито-ферритные стали (0Х18Н9, Х20Н10Г68, 20Х25Н16Т6, табл. 1.3) обеспечивают высокую стойкость против коррозии в ряде сред, окалиностойкость и жаропрочность. Такими сплавами наплавляются лопасти гидротурбин, гребные винты, гребные валы морских судов, разрушаемые кавитацией, коррозией и эрозией. Стали типа Х18Н9, иногда дополнительно стабилизированные титаном или ниобием,

## Высокохромистые наплавочные материалы

Марка	Средний химический состав наплавленного металла по основным легирующим элементам в %										Твердость после наплавки	
	Fe	Ni	Co	C	Si	Mn	Cr	W	V	Ti	B	HRC
1X13	осн.	—	—	0,10	1,2	0,4	12,0	—	—	—	—	32—38
3X13	»	—	—	0,25	0,3	0,4	12,0	—	—	—	—	45—52
5X9C3	»	—	—	0,50	3,0	0,4	9,0	—	—	—	—	53—58
X12BФ	»	—	—	1,7	0,4	0,4	12,5	1,2	0,2	—	—	38—45* 60
X13H4	»	4,5	—	1,9	0,3	0,8	13,0	—	—	—	—	—
У30Х28Н4С4	»	3,5	—	2,9	3,5	1,0	28,0	—	—	—	—	48—54
У35Х20РТ	»	—	—	3,5	0,6	1,8	21,0	—	—	1,5	1,2	56—62
0Х18Н9	»	9,0	—	0,06	0,7	1,0	18,5	—	—	—	—	—
Х20Н10Г6В	»	10,0	—	0,12	0,6	6,0	20,0	1,5	—	—	—	—
20Х25Н16Г6	»	16,0	—	0,20	0,2	6,0	25,0	—	—	—	—	—
Х20Н80	3,5	осн.	—	0,12	0,3	1,0	20,0	—	—	—	—	—
НХ15Р	4,5	«	—	0,75	4,5	—	15,0	—	—	—	3,5	56
КВ5Х30	4,0	2,0	осн.	1,0	1,2	1,0	29,0	4,5	—	—	—	42
КВ20Х30	4,0	2,0	»	2,7	1,2	1,0	32,0	19,0	—	—	—	60

\* В знаменателе — значение твердости после термообработки.

применяются для наплавки поверхностей в сосудах химической, пищевой промышленности, в атомно-энергетических установках.

В целях повышения стойкости против горячих трещин при наплавках (особенно многослойных) обычно стремятся получить либо двухфазный наплавленный металл (часто аустенито-ферритный) с ограниченным количеством второй фазы, либо металл с измельченной структурой (в частности, модифицированием).

Аустенитные сплавы, особенно с повышенным содержанием марганца (Х20Н10Г68, 20Х25Н16Г6) сильно упрочняются при наклепе и могут применяться, например, для наплавки прокатных валков обжимных и пилигримовых станков [68].

Хотя высоконикелевые сплавы (Х20Н80, НХ15Р, КВ5Х30) весьма дороги и дефицитны, однако в ряде случаев они необходимы для наплавки поверхностей, работающих в окислительной среде или весьма высоких температурах (сплав Х20Н80-нихром) либо при трении металла о металл без смазки, например в уплотнительных поверхностях выхлопных клапанов, где сочетаются износ и коррозия (сплав НХ15Р — колмоной, по фирменному названию США). Колмоной значительно тверже нихромов (в связи с большим количеством в структуре карбидов и боридов хрома)

и более склонен к образованию трещин при наплавке, требуя, как правило, подогрева наплавляемого изделия до 300° С и выше.

Сплавы на базе кобальта еще более дефицитны и дороги. Несмотря на это, наплавки такими сплавами (например, KB5X13, KB20X30) применяются довольно широко, так как они обеспечивают наибольшую жаропрочность при относительно непродолжительной эксплуатации. Наплавка этих сплавов, известных под обобщающим названием стеллитов, обычно производится при высоком (~700° С) предварительном подогреве деталей и замедленном охлаждении их после наплавки. Структура стеллитов ( $\gamma$  — твердый раствор в смеси с карбидами в виде игл и эвтектикой) весьма термически устойчива и только при весьма длительном воздействии высоких температур может повышать свою твердость в результате дисперсионного твердения.

Стеллиты с низким содержанием углерода и вольфрама (сплав KB5X30) поддаются ковке и могут при разрушении давать заметное удлинение (2—3% на стандартных образцах). Такие сплавы используются для наплавки прессовых матриц для обработки титановых сплавов, выхлопных клапанов авиационных двигателей, уплотнительных поверхностей арматуры пара высокого давления и других деталей. Более твердые высокоуглеродистые и высоковольфрамовые сплавы (KB20X30) применяются для наплавки буровых долот, деталей доменного оборудования и др.

Кроме рассмотренных наплавочных материалов для ряда изделий наиболее целесообразными являются материалы других составов. Так, например, для ударных нагрузок с наклепом (концы рельсов, крестовин, соединительные муфты прокатных станов и др.) наиболее работоспособными являются высокомарганцовистые стали типа П13. Они также весьма эффективны при ремонте дробильно-размольного оборудования.

В условиях работы при высоких температурах, например при горячей обработке (штамповка, ковка), металл должен обладать высокой твердостью при высоких температурах — краскостью. Эти свойства в железных сплавах достигаются их легированием хромом, ванадием, молибденом и вольфрамом. Некоторые типичные составы высоковольфрамовых сталей приведены в табл. I.4.

Сталь 3X2B8 наиболее широко применяются для наплавки рабочих поверхностей прокатных валков листо- и сортопрокатных станков, втулок и матриц прессов для прессования цветных металлов и др. Наплавленные поверхности такого состава сохраняют высокую твердость изделия, достаточно хорошую пластичность при температуре от 20 до ~600° С.

Стали типа P18 и P9 являются по существу быстрорежущими сталями, используемыми в режущих инструментах для сохранения режущих свойств кромки при высоких температурах.

Высоковольфрамовый чугуи X10B14 при наплавке имеет склонность к образованию трещин, но весьма стоек, например в условиях работы поверхностей большого конуса засыпного аппарата

## Высоковольфрамовые стали и чугуны для наплавки

Марка	Средний химический состав по легирующим элементам в %						
	C	Si	Mn	Cr	W	V	Mo
3X2B8	0,35	0,8	0,9	2,5	8,5	0,3	—
P18	0,75	0,4	0,4	4,2	18,0	1,2	—
P9	0,95	0,4	0,4	4,3	9,0	1,7	5,0
X10B14	3,6	0,6	0,4	10,0	14,0	—	—

доменных печей, повышая их износостойкость по сравнению с углеродистой сталью 35У в 15 раз [68].

Иногда в качестве наплавочных материалов применяют такие сплавы, которые не расплавляются полностью, а лишь частично растворяются в расплавленном металле и, «вмерзая» в него при его затвердевании, сохраняют в основном свою структуру и свойства. Такие составляющие с высокой температурой плавления и твердостью, расположенные в более мягкой матрице, при достаточной прочности этих включений и их связи с матрицей против выкрашивания создают очень высокую стойкость против абразивного износа.

В качестве таких твердых сплавов, применяемых для армирования изнашивающихся деталей, могут использоваться карбиды вольфрама и сплавы с боридами хрома. Некоторые из них приведены в табл. 1.5.

В целях исключения полного растворения или расплавления твердых частиц процессы наплавки, вызывающие значительный перегрев наплавляемого металла (например, дуговая сварка плавящимся электродом), применяться не должны. В этих случаях применяется либо наплавка с расплавлением основы индуктором ТВЧ, либо газопламенная или аргоно-дуговая наплавка с соответствующей подачей присадки.

Таблица 1.5

## Литые карбидные сплавы и сплавы с боридами хрома

Наименование (марка)	Средний химический состав твердых зерен* и наплавленного металла в %						Твердость HRA
	C	B	Cr	W	Mo	Fe	
Релит*	3,3	—	—	95	—	—	90—92
Воломит*	4,0	—	—	93	2	—	90—92
X35P8	0,1	7,7	35,0	—	—	57,0	85
У70Х35Р5	7,3	5,2	37,0	—	—	51,0	80

Как указывалось ранее, для наплавов применяются и сплавы на медной основе. Такие сплавы обладают хорошими антифрикционными свойствами и высокой коррозионной стойкостью. Некоторые из типовых составов, применяемых для наплавки в СССР, приведены в табл. 1.6.

Т а б л и ц а 1.6

Наплавочные сплавы на медной основе

Марка	Средний состав по основным легирующим элементам в %							Твердость НВ
	Al	Fe	Mn	Si	Zn	Pb	Sn	
Бр.АЖ10-1	10,0	1,0	—	0,07	0,01	0,01	—	160—190
Бр.АЖМц10-3-1,5	10,0	3,0	1,5	0,07	—	—	—	170—200
Бр.ОФ5,5-0,3	0,01	—	—	—	—	0,01	0,25	70—85
Бр.ОФС6-0,4-16	—	—	—	—	—	16,0	0,40	40—65
Бр.КМц3-1,5	—	0,3	1,5	3,4	—	0,01	—	80—100

Алюминиевые бронзы обладают высокой плотностью, хорошей коррозионной стойкостью в морской воде, слабых кислотах и щелочах, хорошо обрабатывается режущим инструментом. Поверхности, наплавленные бронзой, хорошо работают при трении металла о металл. Наплавку алюминиевыми бронзами используют в заготовках червячных колес, сухарей и других деталей узлов трения. В связи с высокой коррозионной стойкостью алюминиевая бронза применяется для наплавки в деталях гидротурбин, подверженных кавитации и эрозии.

Оловянно-фосфористые бронзы являются хорошим антифрикционным материалом. Некоторые из них (Бр.ОФ5,5—0,3) применяются в узлах трения при наличии ударных нагрузок.

Наплавка бронзой Бр.КМц3—1,5 применяется главным образом для деталей, подверженных коррозии (задвижки и клапаны, работающие в морской воде).

Наплавки медных сплавов плохо работают на абразивный износ при повышенных температурах (выше  $\sim 200^\circ \text{C}$ ).

Рассмотрение только типовых составов для наплавочных работ дает основание заключить, что, применяя различные наплавочные (сварочные) материалы, можно получить весьма разнообразные комбинации служебных характеристик деталей различного назначения. И в этих случаях необходим правильный выбор сварочных материалов.

Г Л А В А  И

**ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ,  
ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ СВАРКЕ.  
УЧАСТИЕ В НИХ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**§ II.1. Общая схема взаимодействия металлической,  
газовой и шлаковой фаз при сварке**

При всех способах сварки плавлением для локального расплавления металла применяются мощные источники тепловой энергии, позволяющие вводить в ограниченный объем большое количество тепла, создавать значительное местное повышение температуры. Наиболее эффективными при этом являются сварочные источники тепла, позволяющие создавать мощные тепловые потоки, которые даже при высокой теплопроводности свариваемых металлов обеспечивают большой градиент температур от места ввода тепла к окружающему этот объем металлу. Это, как следствие, приводит в большинстве случаев к значительному перегреву основных объемов расплавляемого при сварке металла.

Как указывалось, обычно при сварке плавлением сварочная ванна образуется за счет смешивания расплавленного основного металла и добавочного (наплавляемого). Максимальная температура перегрева металла в сварочной ванне и поступающего в нее обычно в виде капель присадочного металла в большинстве случаев различна. Меньший объем капель, их относительно большая удельная поверхность, через которую поступает тепловой поток, отсутствие в них значительных теплоотводящих масс приводят, как правило, к более значительному их перегреву, по сравнению с металлом ванны.

Только в некоторых случаях, например при газовой сварке железных сплавов, когда присадочный материал вводится прямо в жидкую сварочную ванну и плавится в ней без формирования падающих в пламени капель, и при аргоно-дуговой сварке неплавящимся электродом с присадками в виде вставок в зазоре (см. гл. III) температура перегрева и присадочного металла и сварочной ванны примерно одинакова.

Рассмотрим некоторые примеры температурного состояния расплавленного металла в условиях различных способов сварки плавлением.

При газовой сварке малоуглеродистой стали ( $T_{на} \approx 1500^\circ \text{C}$ ) максимальная температура сварочной ванны у ее

поверхности равна 1630—1650° С [84]; видимо, и для расплавляемого присадочного металла в этом случае максимальная температура также составляет примерно 1650° С. При электрошлаковой сварке стали температура в сварочной ванне, по материалам Г. А. Перцовского [46], в среднем равна ~1680° С, достигая ~2000° С в наиболее нагретой части; температура капель при этом в случае расплавления проволоки превышает 2000° С.

При дуговой сварке плавящимся электродом температура ванны и капель еще выше. Так, средняя температура ванны при сварке под флюсом И. И. Фруминь и И. К. Походней определена в  $1770 \pm 100^\circ \text{С}$  [68]. Температура капель при этом достигает 2400—2500° С [33]. При режимах ручной дуговой сварки средняя температура ванны составляет 1950—2000° С [79], а капель 2100—2500° С [22, 59].

Так как при обычных металлургических процессах производства сталей температура жидкого металла обычно выше 1650—1700° С не поднимается, можно отметить, что в условиях сварочных процессов имеют место значительно более высокие перегревы металла.

То же наблюдается и при сварке других металлов. Например, при аргоно-дуговой сварке титана ( $T_{нс} \approx 1650^\circ \text{С}$ ) неплавящимся электродом, по данным Л. И. Мальцева, температура сварочной ванны равна ~2100° С.

При дуговой сварке алюминия и его сплавов ( $T_{нс} = 640 \div 660^\circ \text{С}$ ) также известны значительные перегревы и ванны, и капель.

Так, при аргоно-дуговой сварке алюминиево-магниевого сплава неплавящимся электродом Ю. А. Деминский определил температуру ванны в пределах 750—900° С. При аргоно-дуговой сварке плавящимся электродом температура капель им определена в зависимости от режима в пределах 1250—1550° С, т. е. приближается к температуре кипения сплава. Температура ванны при этом по расчету (при  $\psi \approx 0,65$ ) составляет ~900—1000° С. При сварке чистого алюминия, по японским данным, температура капель достигает ~1700° С. Ванная при дуговой сварке по флюсу, по измерениям Д. М. Рабкина [61], имеет температуру  $1000 \pm 100^\circ \text{С}$ . Таким образом, и в этих случаях при сварочных процессах температура жидкого металла, особенно капель наплавленного металла, значительно выше температуры плавления свариваемого или присадочного металла. Это обстоятельство должно учитываться при рассмотрении общей схемы взаимодействия материалов в условиях сварки.

Конечной целью расплавления, обработки и кристаллизации металла при сварке плавлением является получение доброкачественного металла шва, имеющего хорошее сплавление с кромками свариваемых деталей, необходимый состав и структуру,



обеспечивающие требуемые свойства. При этом, как правило, весьма важным является максимальное удаление из металла ряда вредных примесей, отрицательно влияющих как на технологическую (т. е. проявляющуюся в связи с самим процессом изготовления сварных конструкций и выполнением сварки), так и на эксплуатационную прочность сварных соединений. Такими примесями являются для железных сплавов S, P, O, N, H и др., а в некоторых высоколегированных сталях, кроме того, Zn, As, Pb и др., в сплавах на медной основе — O, H, Bi, Pb и пр.

Недопущение этих примесей в металл или их наиболее полное удаление из металла связано и с составом применяемых сварочных материалов, и с процессами взаимодействия металла с окружающей материальной средой при сварке.

При сварке металл всегда контактирует с окружающей средой. Это или газовая фаза (воздух, защитные газы, смеси газов и паров, вакуум и пр.), или шлаковые расплавы (различные окислы, галогениды, их смеси и т. д.), или и газы, и шлаки. В процессе сварки происходит взаимодействие металла, особенно перегретого выше температуры плавления, с этими газами и шлаками. Такое взаимодействие может быть для металла полезным, но в большинстве случаев портит его состав и свойства. Поэтому процессы взаимодействия металла с газами и шлаками при сварке следует обязательно учитывать и по возможности регулировать в нужном направлении.

Изменения состава металла в сварочных условиях определяются, во-первых, испарением в связи с высокими температурами перегрева жидкого металла и, во-вторых, обменными реакциями с газами и шлаками, в частности окислительными процессами. Кроме того, возможно и просто физическое растворение в металле элементов из окружающей его материальной среды.

Рассмотрим эти наиболее характерные процессы.

Известно, что металл в твердом или расплавленном, жидком, состоянии частично испаряется и создает около своей поверхности пар, давление которого стремится к равновесному, называемому упругостью насыщенного пара и определяемому температурой. Равновесное давление пара над чистым элементом в зависимости от температуры может быть оценено формулой Клапейрона—Клаузиуса

$$\lg p = - \frac{\Delta H}{4,575T} + B, \quad (\text{II.1})$$

где  $p$  — давление пара над жидким металлом;  
 $\Delta H$  — теплота испарения, принимаемая упрощенно постоянной;

$T$  — абсолютная температура;

$B$  — постоянная, зависящая от свойств металла и принятых единиц измерения давления.

Значения величин, определяющих упругость паров и температуры кипения ( $p = 1 \text{ кг/см}^2$ ) некоторых элементов, входящих в ряд конструкционных сплавов, приведены в табл. II.1.

Т а б л и ц а II.1

Значения  $\Delta H$ ,  $B$  и  $T_{\text{кип}}$  для некоторых металлов

Сопоставляемые величины	Zn	Mg	Al	Mn	Cr	Cu	Fe
Теплота испарения в кал/моль	27 430	32 520	61 020	55 150	76 630	72 800	84 620
Постоянная $B$ (для расчета $p$ в $\text{кг/см}^2$ )	5,81	5,158	5,727	4,975	6,075	5,552	6,144
Температура кипения в °K	1180	1376	2773	2423	2703	2863	3023

Зависимость упругости пара чистых железа и марганца от температуры показана на рис. II.1 сплошными линиями.

Практически при сварке в большинстве случаев расплавляются не чистые металлы, а сплавы. В этих случаях пар представляет

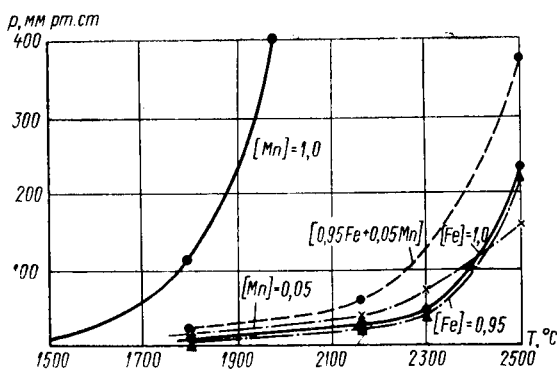


Рис. II.1. Давление паров железа и марганца над чистыми жидкостями и сплавом 95% Fe + 5% Mn

собой смесь паров компонентов сплава, причем более легкокипящие элементы составляют относительно большую часть (давление) паров. Для разбавленных растворов (сплавов с относительно небольшой добавкой примеси к основе) давление пара над жидкостью можно подсчитать по закону Рауля

$$p_a = p_a^0 N_a \quad (II.2)$$

где  $p_a$  — давление пара жидкости  $a$  в растворе;

$p_a^0$  — давление пара чистой жидкости  $a$ ;

$N_a$  — молярная доля жидкости  $a$  в растворе.

Давление паров железа и марганца над сплавом с 0,95 молярных долей Fe и 0,05 Mn (т. е. над сплавом примерного состава 95% вес. Fe и 5% вес. Mn), сосчитанные раздельно, показаны на рис. 11.1 штрих-пунктирными линиями, а суммарное давление пара как сумма парциальных давлений — штриховой линией.

Из расчета следует, что в диапазоне сварочных температур при наличии в сплаве только 5% Mn давление его паров несколько больше давления паров 95% Fe, а суммарное давление паров в 2—3 раза больше, чем давление пара над чистым железом. Особенно заметно увеличение давления легкокипящего элемента — марганца при повышении температуры до 2200—2400° С, т. е. таких, которые при дуговой сварке имеются в каплях электродного металла (электродной проволоки, электрода с покрытием и пр.), а не в основном металле, поступающем в расплавленном состоянии в ванну, имеющую меньшую среднюю температуру. Этим определяются исследования Ленинградского института охраны труда, которые показали, что при сварке марганцовистой стали (~20% Mn) хромоникелевыми электродами содержание окислов марганца в пыли было относительно небольшим:  $\sim \frac{11,9 - 4,0}{6,6} \%$  при количестве пыли 103 мг/л, а при сварке ее аналогичными, т. е. высокомарганцовистыми, электродами содержание окислов марганца в пыли было значительно большим:  $\frac{36,9 - 11,3}{24,5} \%$  при количестве пыли 198 мг/л.

По этой же причине при сварке электродами марки ЦМ-7, имеющими в составе покрытия большое количество ферромарганца, дающего марганца в пересчете к железной части электрода 10% (правда, без учета его части, идущей на раскисление гематита покрытия), происходит значительное выделение токсичных паров марганца, ограничивающих применение этих электродов.

Примеры выборочного испарения более легкокипящих элементов при дуговой сварке плавящимися электродами на базе железных и медных сплавов, по материалам А. А. Алова, приведены в табл. 11.2.

Данные таблицы 11.2. качественно полностью подтверждают проведенный выше теоретический анализ. Действительно, так как марганец (а также и кремний) легче испаряется, чем железо (см. табл. 11.1), его содержание в парах больше, чем в металле электрода (2,33 и 1,5%).

Аналогично и для электрода из медного сплава: за счет более легкого испарения цинка содержание его в парах составляет ~60%, а меди только 34%, т. е. заметно меньше, чем ее содержание в электроде (58%).

Заметные потери цинка испарением известны не только при дуговой, но и при газовой сварке латуней.

Сопоставление составов электрода  
и уловленных из дугового промежутка паров металла

Анализируемый состав	Химический состав металла и паров в % при различных электродах					
	стальных			из медного сплава		
	Fe	Mn	Si	Cu	Zn	Sn
Электрод	—	1,5	0,53	58,0	39,16	0,74
Наплавленный металл	—	0,39	0,14	69,3	29,2	Не опреде- лялось
Уловленные пары	96,76	2,33	0,91	33,9	59,8	2,3

При электроннолучевой сварке латуней испарение цинка столь значительно, что камера оказывается полностью «запыленной» его конденсированными парами.

Опубликованных данных о количестве выделяющихся при сварке паров немного. По экспериментам И. Р. Пацкевича, при дуговой сварке плавящимся голым электродом количество испаряющегося металла составляет  $\sim 3\text{--}6\%$  от веса расплавляющегося электрода.

Простейший расчет показывает, что при этом в результате расплавления 1 г железной электродной проволоки при  $0^\circ\text{C}$  и давлении 1  $\text{кг}/\text{см}^2$  должно образовываться паров железа  $\frac{22400 \cdot 0,03}{56} \div \frac{22400 \cdot 0,06}{56} = 12 \div 24 \text{ см}^3/\text{г}$ , а при пересчете на среднюю температуру паров ( $\sim 2000^\circ\text{C}$ )—соответственно 96—192  $\text{см}^3/\text{г}$ .

Интересно, что В. Н. Иваненко и Н. М. Будник [30] при дуговой сварке голой проволокой марки Св-08 при  $I_{св} = 180 \div 400 \text{ а}$  и  $U_d = 24 \text{ в}$  получили значения 55—177  $\text{см}^3/\text{г}$ , т. е. весьма близкие к приведенным выше. В той же работе для сварочной проволоки, легированной  $\sim 1\%$  Mn и  $0,7\%$  Si (марки Св-08ГС), зафиксированное количество паров оказалось несколько бóльшим (66—203  $\text{см}^3/\text{г}$ ), что также качественно согласуется с положениями, изложенными выше. С увеличением  $U_d$  до 32 в количество выделяющихся паров как при сварке проволокой Св-08, так и Св-08ГС увеличивается на 20—25% [30].

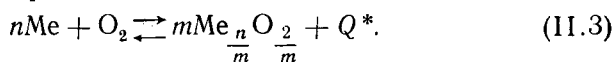
Таким образом, в процессах сварки, особенно при наиболее распространенной дуговой сварке плавящимся электродом, испарение металла (в основном электродных сварочных материалов) имеет значительное развитие и обязательно должно учитываться при рассмотрении возможных изменений состава металла при сварке.

Вторым видом процессов, сопровождающих сварку, являются процессы химического взаимодействия металла с газами и шлаками, контактирующими с расплавленным (а частично и испаряю-

щимся) металлом. Из этих реакций наиболее часто имеют место окислительно-восстановительные, которые весьма значимы и для конечных свойств металла шва.

Попадание кислорода в жидкий металл может происходить за счет прямого окисления газообразным кислородом, обменных реакций металла с окислами других элементов, а также посредством растворения окислов. Возможно также чисто механическое «запутывание» окислов в виде пленок или скоагулированных частиц в расплавленном металле в случае, если они в нем не растворяются (например,  $Al_2O_3$  в  $Al$  и др.).

Рассмотрим вначале простейший случай непосредственного окисления металла свободным газообразным кислородом. Эти процессы имеют место при дуговой сварке плавящимся голым электродом в атмосфере воздуха и в большинстве случаев сварки электродами с покрытиями, при газовой сварке, при сварке в вакууме электронным лучом и при других методах сварки. В этих случаях происходит реакция



В простейшем виде (например, для закиси железа  $FeO$ , никеля  $NiO$  и других окислов) реакция примет вид



Эти реакции обратимы и могут идти как в сторону окисления металла (справа налево, с выделением тепла  $Q_{MeO}$ ), так и в сторону восстановления — диссоциации окислов (слева направо, с поглощением тепла). Направление реакции определяется стремлением к равновесию системы  $Me$ ,  $MeO$  и  $O_2$ , определяемому внешними факторами — температурой и давлением. Равновесие реакции определяется константой равновесия

$$K_{C_{MeO}} = \frac{[Me]^2 [O_2]}{[MeO]^2} \quad (II.5)$$

или при двух конденсированных (твердых, жидких) фазах ( $Me$ ,  $MeO$ ) концентрацией кислорода или его парциальным давлением  $p_{O_2}$ , — упругостью диссоциации окисла

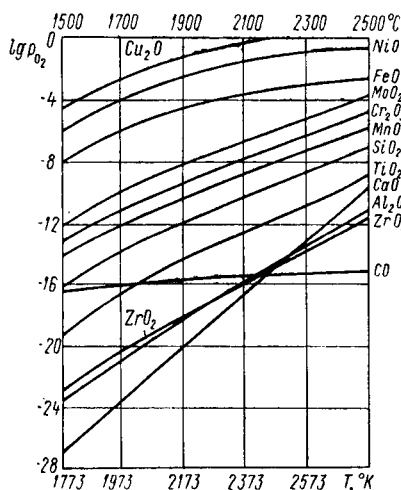
$$K_{C_{MeO}} = [O_2] \text{ или } K_{p_{MeO}} = p_{O_2}.$$

Константы равновесия реакций применительно к большинству сварочных процессов, выполняемых при постоянном внешнем давлении, зависят от температуры. Константы, характеризующие

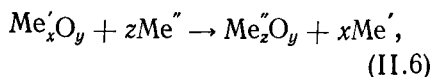
\* В условиях сварки возможна и реакция металла с атомарным кислородом  $nMe + O \rightleftharpoons mMe \frac{n}{m} O \frac{1}{m}$ , однако для упрощения эту реакцию рассматривать не будем.

диссоциацию окислов, происходящую с поглощением тепла, указывают на понижение их стойкости с увеличением температуры. Зависимость упругости диссоциации окислов различных элементов, представляющих интерес в сварочных процессах, от температуры приведена на рис. II.2.

Сродство к кислороду элементов, расположенных на рисунке ниже, большее, чем сродство элементов, расположенных выше.



Поэтому элемент  $Me''$ , имеющий большее сродство к кислороду, чем  $Me'$ , может обеспечивать протекание обменных реакций типа



т. е. элементы с большим сродством к кислороду выступают как раскислители окислов элементов с меньшим сродством к кислороду.

В растворах величины активности металла и его окисла могут изменяться и влияют на величину упругости диссоциации. Например, для реакции  $2Me + O_2 = 2MeO$

Рис. II.2. Упругость диссоциации свободных окислов в интервале высоких температур.

$$p'_{O_2} = K_p \frac{a_{MeO}^2}{a_{Me}^2}, \quad (II.7)$$

где  $a_{MeO}$  и  $a_{Me}$  — соответственно активности окисла  $MeO$  и металла  $Me$ .

Заменив значение  $K_p$  на  $p_{O_2}$  (упругость диссоциации чистого окисла), получим

$$p'_{O_2} = p_{O_2} \frac{a_{MeO}^2}{a_{Me}^2}. \quad (II.8)$$

Если раствор насыщен окислом металла, то  $a_{MeO} = 1$  и уравнение принимает вид

$$p'_{O_2} = p_{O_2} \frac{1}{a_{Me}^2}. \quad (II.9)$$

Хотя активности изменяются не строго согласно изменению концентраций, однако для оценки влияния концентрации элемента  $Me$  можно  $a_{Me}$  заменить на концентрацию  $[Me]$  в растворе. Тогда при содержании в растворе  $[Me]$  в количестве 1% (т. е.  $Me = 0,01$ ) упругость диссоциации окисла  $MeO$  изменится приблизительно на четыре порядка. Поэтому для активного действия

раскислителей требуется и их достаточная концентрация в растворе.

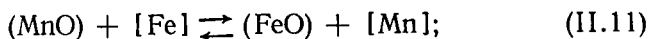
В не насыщенных окислом растворах необходимо учитывать и степень недонасыщенности и, следовательно, изменение активности. Так, при  $a_{\text{Me}} = 1$  получим

$$p'_{\text{O}_2} = p_{\text{O}_2} a_{\text{MeO}}^2, \quad (\text{II.10})$$

откуда следует, что с уменьшением активности окисла (или его концентрации) уменьшается и упругость его диссоциации.

При наличии парциального давления кислорода в газовой фазе  $\{p_{\text{O}_2}\}$  большем, чем упругость  $p'_{\text{O}_2}$  диссоциации окисла металла при данных условиях (температура, давление, концентрация элемента в растворе), будет происходить окисление металла. В противоположном случае, т. е. при  $\{p_{\text{O}_2}\} < p'_{\text{O}_2}$ , — восстановление окислов с выделением свободного кислорода. Обычно в условиях сварки  $\{p_{\text{O}_2}\} > p'_{\text{O}_2}$  и характерными являются процессы окисления.

Как указывалось выше, при сварке возможно окисление металла капель и ванны за счет его обменных реакций с контактирующими с ним окислами — составляющими шлаков. При этом окисление может происходить не только за счет контакта металла с окислами элементов с меньшим сродством к кислороду, по реакции типа (II.6) (например, при контакте расплавленного железа с окислами никеля, имеющего согласно рис. II.2 меньшее сродство к кислороду, чем железо), но и в других случаях. Так, при контакте в сварочных условиях расплавленного шлака, состоящего из окислов марганца и кремния, с расплавленным железом, имеющим в системах  $\text{Me}—\text{MeO}$  (см. рис. II.2) меньшее сродство к кислороду, при высоких температурах и определенных количествах и концентрациях также возможны обменные реакции



В результате этих кремне- и марганцевосстановительных процессов одновременно появляется некоторое количество закиси железа, которая растворяется в металле, повышая в нем концентрацию кислорода, т. е. окисляя его. Естественно, что при этом восстановление железом окислов марганца и кремния происходит в значительно меньшей степени, чем, скажем, окислов никеля, имеющего меньшее сродство к кислороду, чем железо. Например, марганце- и кремневосстановительные процессы при автоматической дуговой сварке малоуглеродистой стали плавящейся малоуглеродистой проволокой марки Св-08 (Св-08А) в результате восстанавливают только 3—5%  $\text{MnO}$  и  $\text{SiO}_2$  от их количества в расплавляемом высококремнистом, высокомарганцовистом флюсе типа ОСЦ-45 или АН-348.

Аналогично протекают и боровосстановительные реакции. Так, при сварке под флюсом, содержащим около 1%  $V_2O_5$ , за счет таких процессов восстанавливается и растворяется в металле бор. По конечному анализу количество восстановленного бора составляет  $\sim 3-4\%$  его массы в расплавленном при сварке флюсе.

Кроме рассмотренных процессов окисления в некоторых случаях возможно растворение окислов шлака в металле. Так, ряд металлов достаточно заметно растворяет окислы этого же металла (например, железо растворяет закись железа, медь — окислы меди). При наличии в шлаке, контактирующем с металлом, значительного количества таких свободных окислов они перераспределяются между металлической и шлаковой фазами, стремясь к равновесию, определяемому константой распределения  $L_{MeO}$ ,

$$L_{MeO} = \frac{(MeO)}{[MeO]}, \quad (II.13)$$

где  $(MeO)$  и  $[MeO]$  — соответственно концентрация свободного окисла в шлаке и в металле.

Концентрация свободного окисла в шлаке определяется не только его общим содержанием в шлаке, но и возможным образованием комплексных соединений этого окисла с другими и их термической устойчивостью. Так, более термически стойкие комплексные соединения, обладающие при температурах процесса меньшей степенью диссоциации, будут обеспечивать в шлаке меньшую концентрацию свободного окисла.

Константа распределения  $L_{MeO}$  зависит от температуры.

Наличие окисления металла в условиях сварки в случаях, когда это вызывает недопустимое ухудшение свойств, заставляет применять раскисление. Раскисление применяется осаждающее и диффузионное.

При осаждающем раскислении окислы, растворенные в жидком металле, введением раскислителя переводятся в окислы, нерастворимые в металле, и выделяются в виде частиц отдельной фазы, удаляемых в той или иной степени за счет всплывания или выталкивания фронтом кристаллизующегося металла ванны.

При диффузионном раскислении растворимые окислы удаляются в шлак, который обычно обедняется за счет связывания этого свободного окисла в достаточно прочные комплексные соединения с другими составляющими шлака.

Принципиально аналогично кислороду на свойства металла могут отрицательно влиять и другие вредные примеси. Например, для сплавов на железной основе, особенно высоколегированных, и для никелевых сплавов такой примесью является сера. Борьба за получение металла швов с достаточно низкой концентрацией серы, с одной стороны, осуществляется максимальным ограничением ее содержания в сварочных материалах (присадочных металлах, шлаках, материалах электродных покрытий, газах, например, горючих для газовой сварки, и пр.), с другой стороны —



удалением ее из жидкого металла обычно путем связывания основными шлаками, содержащими кальций (в меньшей степени — марганец), реже — путем связывания в нерастворимые в металле соединения, в частности летучие.

Удаление фосфора из металла при сварке ряда сплавов также имеет большое значение для получения необходимых конечных свойств. Способы удаления фосфора обычно аналогичны способам, применяемым для получения минимального содержания серы. Однако при сварке медных сплавов в ряде случаев фосфор специально вводится сварочными материалами (присадкой, флюсами) для необходимого раскисления ванны.

Весьма важно для свойств большинства свариваемых сплавов содержание в металле швов водорода и азота.

В о д о р о д почти при всех способах сварки плавлением присутствует в сварочной реакционной зоне. Это либо водород горючих газов — при газовой сварке; либо диссоциированные пары воды — при дуговой сварке в атмосфере активных или технических инертных газов (аргон, гелий); либо вода в виде влаги, кристаллизационной или цеолитной воды в сварочных флюсах и электродных покрытиях. Водород является продуктом распада органических составляющих, применяемых в ряде электродных покрытий или присутствующих в виде загрязнений на металле; он выделяется при диссоциации водных окислов — гидратов [например, ржавчины, упрощенно представляющей  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ], присутствующих на кромках свариваемых листов или на присадочном (электродном) металле; водород может поступать в зону сварки в виде паров воды из окружающего влажного воздуха.

Некоторые металлы не образуют с водородом химических соединений — гидридов. Растворимость водорода в них с повышением температуры заметно увеличивается. Другие (например, титан, цирконий, ниобий и пр.) являются гидридообразующими, причем их гидриды стойки при относительно низких температурах; при температурах сварочного процесса эти металлы также растворяют водород.

Растворение водорода происходит либо в атомарном виде, либо в виде протонов. Наличие в газовой фазе молекулярного водорода перед его растворением требует диссоциации его на атомы, например в дуге или при соударении молекул с поверхностью твердого или жидкого растворителя.

В области исследованных температур концентрация водорода в железе (и ряде других металлов) подчиняется закону Сивертса [67]

$$[\text{H}] = K_{\text{H}_2} \sqrt{p_{\text{H}_2}}, \quad (\text{II.14})$$

где  $[\text{H}]$  — концентрация водорода в металле с  $\text{см}^3/100 \text{ г}$ ;

$p_{\text{H}_2}$  — парциальное давление молекулярного водорода в газовой фазе;

$K_{\text{H}_2}$  — константа равновесия, зависящая от температуры.

В связи с обычно высокими температурами сварочных источников тепла, применяемых при сварке плавлением, водород уже в газовой фазе может находиться в атомарном и ионизированном состояниях.

Упрощенно для случая присутствия в газовой фазе и молекулярного и атомарного водорода его растворимость (предельная концентрация) в металле может быть определена по формуле \*

$[H], \text{см}^3/100\text{г}$

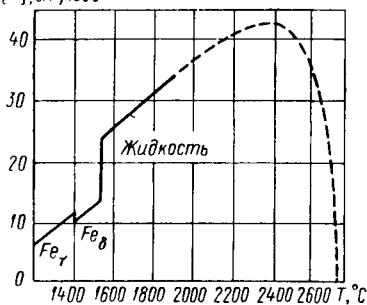


Рис. 11.3. Зависимость растворимости водорода в железе от температуры при парциальном давлении его в газовой фазе  $\leq 1 \text{ кг}$

$$[H] = K_{H, H} \sqrt{p_{H_2, H}^{1+x}}, \quad (11.15)$$

где  $x$  — степень диссоциации молекулярного водорода;

$K_{H, H}$  — константа равновесия смеси молекулярного и атомарного водорода.

Выше отмечалось, что при всех основных методах сварки плавлением концентрации кислорода, имеющиеся в газовой фазе, приводят к протеканию реакций только в сторону окисления металла. По отношению к водороду металлы ведут себя иначе:

при различных методах сварки они могут либо поглощать водород из окружающей газовой фазы, либо десорбировать (например, при повышенном содержании водорода в сварочной ванне в процессе сварки титана дугой в очищенном от паров воды аргоне или в процессе электроннолучевой сварки в вакууме). Однако для большинства обычных металлов (при газовой или дуговой сварке сплавов на железной, никелевой, медной основах) в целом характерным является повышение в жидком металле концентрации водорода до количеств, сопоставимых с равновесными при этих температурах. Известная зависимость растворимости водорода в железе от температуры при изменении ее от комнатной до температуры кипения для  $p_{H_2} = 1 \text{ кг/см}^2$  приведена на рис. 11.3.

Растворенный водород по мере снижения температуры (а следовательно, и растворимости) стремится выделиться из раствора и удалиться. В жидком металле он образует пузыри и, барботируя, удаляется в газовую фазу; в твердом металле он диффундирует в виде атомов и протонов; в металле шва — как в сторону поверхностей, откуда удаляется в газовую фазу, так и в околошовные зоны свариваемого металла, скапливаясь в различных

\* Формулой не учитывается возможность наличия ионизированного водорода. Степень ионизации водорода в газовой фазе при сварочных процессах не установлена.

неплотностях (вакансиях, дислокациях, макропустотах) и оставаясь в растворе в значительных массах металла, примыкающих к шву. Эти процессы происходят не только при температурах сварки, но для ряда металлов, в частности, углеродистых и низколегированных сталей, продолжают и после полного охлаждения сварного соединения.

Процессы поглощения водорода, его удаления из жидкого металла и распределения в твердом чрезвычайно важны как для получения плотных беспористых швов, так и для получения соответствующих свойств сварных соединений ряда металлов и сплавов.

Азот взаимодействует с различными металлами не одинаково. Так, например, при сварке титана это взаимодействие в связи с образованием нитридов определяется химическими реакциями. При сварке железа и его сплавов основным процессом является физическое растворение азота в жидком металле, подобно водороду. В связи с диссоциацией части молекулярного азота, например при дуговой сварке, и образованием в газовой фазе атомарного азота (а при наличии кислорода — и закиси азота) его поглощаемость железом отклоняется (особенно при невысоких парциальных давлениях азота) от закона Сивертса [83], хотя удовлетворительного объяснения причин такого отклонения, по имеющимся литературным данным, нет. При средних значениях парциальных давлений азота его поглощаемость удовлетворительно определяется формулой типа (II.14).

В твердом металле при обычных температурах диффузионная подвижность азота в металлах невелика, и он не удаляется из металла шва и зоны сплавления, оставаясь в растворе или при избыточных концентрациях и более низких температурах образуя нитриды, например железа. В этом случае азот заметно влияет на свойства металла.

В меди азот практически не растворяется.

Как показано выше, процессы взаимодействия металла с окружающей средой при сварке весьма разнообразны, сложны и требуют учета.

## **§ II.2. Степень завершенности реакций взаимодействия в условиях сварки**

В связи с обратимостью почти всех процессов, рассмотренных в предыдущем параграфе, все они стремятся к равновесию, т. е. к состоянию с наименьшей величиной термодинамических потенциалов, характеризующемуся одинаковой скоростью прямой и обратной реакций. Равновесное состояние является функцией температуры. В условиях сварки температура металла и взаимодействующей с ним среды все время меняется. Поэтому говорить о возможности получения равновесия в реакциях взаимодействия металла с окружающей средой между фазами нельзя. Однако

оценка степени приближения к равновесию может позволить принять решение о возможности или невозможности использования расчетов, основанных на равновесии, применительно к сварочным условиям.

Возможность приближения к равновесию зависит от исходного состояния системы, т. е. от необходимой степени ее изменения для достижения равновесия (степени «отстояния» от равновесия) и скорости процесса, реакции (чем больше эта скорость, тем быстрее за меньшее время система сблизится с равновесным состоянием). Исходное состояние системы металл — среда в условиях

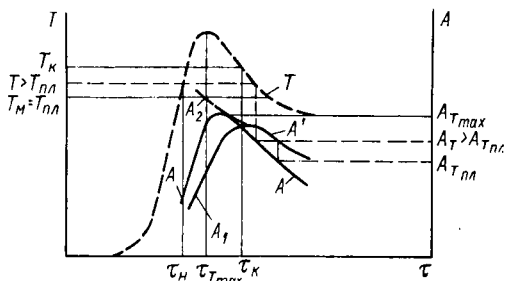


Рис. 11.4. Изменение соотношений равновесного и фактического состояний реакции по ходу термического цикла расплавленного металла при сварке

сварки может значительно и незначительно отличаться от ожидаемых равновесных условий. Скорость реакций при высоких температурах, характерных для сварки, особенно при развитых поверхностях контакта металла (главным образом капель) с окружающей средой, весьма большая. Поэтому принципиально возможны если и не достижение равновесия реакций взаимодействия перегретых металла и

среды, то достаточно высокая степень приближения их к равновесию.

Принципиальная схема изменения во времени  $\tau$  температуры  $T$  металла (в частности, наплавляемого) в условиях сварки, условного показателя  $A$  равновесия реакции металла с какой-то составляющей окружающей среды и фактического показателя этой реакции  $A'$  в те же моменты времени приведена на рис. 11.4. Как следует из рисунка, в зависимости от исходного  $A_1$  или  $A_2$  состояния (например, взаимоотношений концентраций металла и рассматриваемого элемента) при значительном повышении температуры реакции стремится к равновесию, и  $A'$  сближается с  $A$ , соответствующим конкретной температуре. При дальнейшем повышении температуры показатель равновесия  $A$  изменяется (на графике растет), но и фактический показатель состояния реакции  $A'$  стремится к равновесию, причем с большей скоростью, характерной для всех реакций при высоких температурах. Однако при этом все время  $A'$  как бы отстает от  $A$ .

Когда температура достигает величины  $T_{max}$  и показатель равновесия  $A$  имеет предельное значение, фактический показатель  $A'$  в этот момент не достигает значения  $A_{T_{max}}$ , а имеет значение на рис. 11.4 несколько меньшее, как бы отвечающее  $T < T_{max}$ . После достижения  $T_{max}$  температура снижается, а соответственно снова в обратном направлении изменяется и  $A$ . Однако, так как

$A' < A$  и соответствует к моменту достижения  $T_{\max}$  равновесному  $A$  для более низкой температуры, то даже при начальном снижении температуры  $A'$  продолжает расти (т. е. стремиться к  $A$ , соответствующему более высокой температуре). Таким образом,  $A$  уже уменьшается, а  $A'$  продолжает расти. К какому-то моменту  $\tau_k$  (т. е. при какой-то температуре  $T_k$  на ветви ее снижения) значения  $A$  и  $A'$  сравниваются.

После этого в связи с продолжающимся снижением температуры значение  $A$  продолжает уменьшаться, и значение  $A'$ , стремящееся к  $A$ , перейдя через максимальное свое значение при  $\tau_k$ , также получит тенденцию к снижению, но будет опять отставать от  $A$ . Это отставание по мере снижения температуры принципиально должно увеличиваться, так как скорости реакций при более низких температурах уменьшаются. К моменту достижения температуры  $T_m$ , например температуры кристаллизации жидкого металла (на рисунке  $T_m = T_{пл}$ ), реакцию будем считать приостановившейся. При этой температуре  $A$  должно быть равно  $A_{T_{пл}}$ . Отстающее значение  $A'$  к этому моменту будет соответствовать значению  $A$ , но относящемуся как бы к более высокой температуре —  $T > T_{пл}$ .

Таким образом, стремление к равновесию для быстро протекающих процессов взаимодействия, например жидкого металла с газом или с какой-то составляющей шлака, должно приходиться к состоянию, не соответствующему равновесию при  $T = T_{пл}$ , а как бы фиксировать состояние, отвечающее равновесным соотношениям для несколько более высокой температуры.

Действительно, специально поставленными опытами И. И. Фрумин показал [68], что применительно к автоматической дуговой сварке малоуглеродистой стали под флюсами конечная система отвечает равновесным значениям не для  $T = T_{пл}$  ( $\sim 1500^\circ \text{C}$ ), а совпадает с расчетными значениями  $T = 1600 \div 1750^\circ \text{C}$ .

Аналогичные результаты применительно к другим случаям были получены и А. А. Ерохиным [22].

Естественно, что условием максимального приближения фактического состояния системы к состояниям, определяемым изменениями равновесия, являются достаточно большие скорости реакций. Хотя понятия о равновесии статичны, приближение к равновесию в реальных, особенно быстро протекающих процессах возможно только с учетом кинетических представлений. Применительно к сварке впервые наиболее полно они исследованы и проанализированы А. А. Ерохиным [22].

Из самого представления о равновесии обратимых реакций следует, что оно достигается при равенстве скоростей прямой и обратной реакций, т. е. когда разность этих скоростей равна нулю. Чем дальше система от состояния равновесия, тем разность этих скоростей, т. е. фактическая скорость изменения состояния системы, больше. Это создает предпосылку и для большей скорости приближения системы к равновесию, если ее исходное состояние

дальше от равновесного. Так, на рис. 11.5 показано изменение концентрации марганца от исходной (прямая 1) к фактической (прямая 2). Расчетное значение равновесной концентрации показано прямой 3. Как следует из рисунка, при  $[Mn]_{исх} < 1\%$  равновесная концентрация больше исходной (отрезок прямой 3 расположен выше прямой 1). Фактически при  $[Mn]_{исх} \approx 0,55\%$  наблюдается приращение концентрации марганца от исходной в сторону равновесной. Наоборот, при  $[Mn]_{исх} \approx 2\%$  равновесная концентрация должна быть заметно меньше исходной. Фактическая концентрация при этом хотя и не достигает равновесной, но смещается в ее направлении от исходной (т. е. уменьшается)

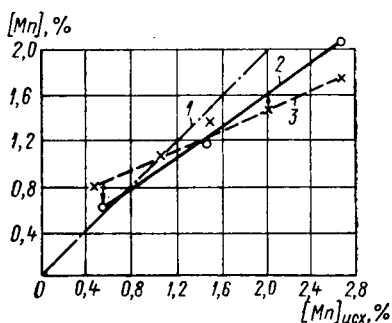


Рис. 11.5. Соотношение исходной (1), фактической (2) и равновесной (3) концентраций марганца в наплавленном металле при его различной исходной концентрации в металле

на заметно большую величину, чем приращение марганца в первом случае.

Для промежуточной концентрации  $[Mn]_{исх} \approx 1,4\%$ , когда отличие исходной концентрации от равновесной относительно невелико, хотя скорости реакций и меньше, фактическая концентрация опять смещается относительно исходной и практически становится почти равной равновесной. Эти материалы А. А. Ерохина относятся к случаю химического взаимодействия марганцесодержащей стали со сварочными шлаками.

Аналогичное стремление к равновесию в сварочных условиях можно показать и на примере сорбции—десорбции водорода титаном при аргоно-дуговой сварке и использованием аргона с различной влажностью (с различной точкой росы). Эта зависимость показана на рис. 11.6 [53].

На рис. 11.6, а прямая  $[H_2]_н$  показана условно равновесная зависимость  $[H] = k\sqrt{p_{H_2}}$ , пересчитанная по сварочным опытом значениям  $k$  и значениям  $\sqrt{p_{H_2}}$ , полученным из пересчета влажности (точки росы) аргона. Двумя горизонтальными прямыми показаны исходные значения  $[H]$  в переплавляемых аргоно-дуговой сваркой присадочных материалах: с большой концентрацией водорода.  $[H]_{э_2} = 0,008\%$  вес. и малої (после отжига в вакууме)  $[H]_{э_1} = 0,001\%$  вес. Соответственно при большой влажности аргона и малой исходной концентрации водорода в металле в условиях сварки должна проходить сорбция (поглощение) водорода (прямая  $[H_2]_н$  расположена заметно выше исходной концентрации  $[H] = 0,001\%$ ). Практически это подтверждается и анализами (рис. 11.6, б). При чистом по водороду аргоне (точка росы —  $70^\circ C$ ;  $p_{H_2} \approx 0,0001 \text{ кг/см}^2$ ) равновесная концентрация водорода в титане, согласно рис. 11.6, а, примерно

равна 0,002% вес. При опытах с  $[H_2]_{исх} \approx 0,0025\%$  отличия в конечной концентрации водорода от исходной практически нет (прямая 3). Фактическое содержание водорода в переплавленном сварочной дугой металле ( $\sim 0,002\%$  вес.) примерно соответствует прямой 1, т. е. при этом ни сорбции, ни десорбции не наблюдается. При более загрязненном парами воды аргоне (точка росы  $-30^\circ C$  и  $p_{H_2} \approx 0,00026 \text{ кг/см}^2$ ) и малой исходной концентрации водорода ( $\sim 0,025\%$  вес.) конечное содержание водорода изменяется незначительно, но и в этом случае располагается между прямой 1

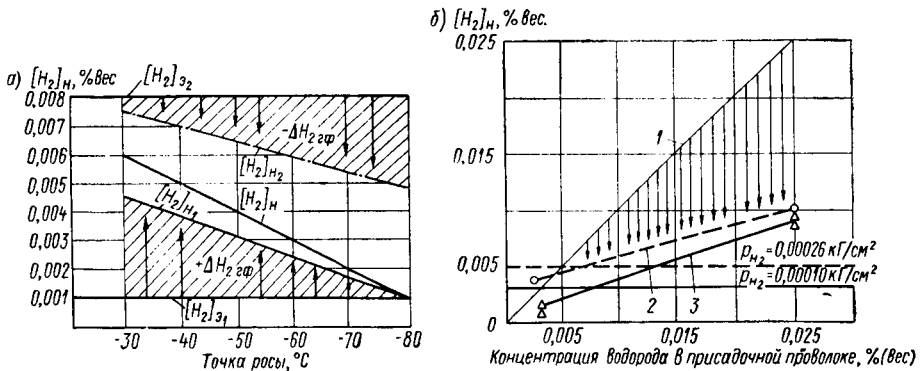


Рис. 11.6. Зависимость концентрации водорода в наплавленном металле от состава титановой присадочной проволоки и влажности аргона: а — схема; б — сопоставление с экспериментом в камере с контролируемой атмосферой;  $[H]_{H_1}$  и  $[H]_{H_2}$  — концентрации водорода в наплавленном металле

и равновесной при этом  $p_{H_2}$ , отвечающей значению  $[H_2]_H = 0,0005\%$  вес., т. е. здесь имеет место некоторое поглощение водорода металлом.

При большой исходной концентрации водорода в металле и загрязненным парами воды аргоне (точка росы  $-30^\circ C$  и  $p_{H_2} \approx 0,00026 \text{ кг/см}^2$ ) и исходной концентрации водорода больше равновесной наблюдается десорбция (приближение к равновесной — зависимость 2). При том же составе металла и более чистом аргоне (точка росы  $-70^\circ C$ ) десорбция водорода из металла более значительна (зависимость 3), т. е. опять имеет место стремление к равновесию. Но и в этих случаях фактическая концентрация до равновесных значений не доходит, так как процесс не успевает завершиться.

Таким образом, и в физическом процессе поглощения и выделения водорода расплавленным металлом имеет место стремление к равновесию. При этом отдаленность исходного состояния от равновесия усиливает, ускоряет процессы (абсолютное значение изменений концентраций от исходного до фактического за время сварки увеличивается); однако конечное состояние системы при большей удаленности ее исходного состояния от равновесия все же,

как правило, больше отличается от равновесного, чем в случае, когда исходное состояние сразу близко к равновесному.

Из приведенных примеров следует, что необходимо учитывать и другие факторы, влияющие на интенсивность реакций взаимодействия металла с окружающей средой, в частности, относительную поверхность металла (отношение реагирующей поверхности к объему расплавленного металла). Так, например, при сварке титана в атмосфере аргона с различными дозированными добавками кислорода (азота) [74, 75] при различных режимах дуги и длительности взаимодействия газов с расплавленным металлом ванны были получены приращения кислорода  $\Delta [O]$  (азота) в металле, пропорциональные относительной поверхности ванны, времени и парциальному давлению реагирующего газа в газовой фазе

$$\Delta [O] = k_O \left( \frac{F}{V} \right) \tau O_2 22,2 \% \text{ вес.}, \quad (\text{II.16})$$

- где  $F$  — поверхность ванны в  $\text{см}^2$ ;  
 $V$  — объем жидкого металла ванны в  $\text{см}^3$ ;  
 $\tau$  — длительность существования жидкого металла (в опытах от 10 до 30 сек);  
 $O_2$  — содержание кислорода в газовой фазе в % об.;

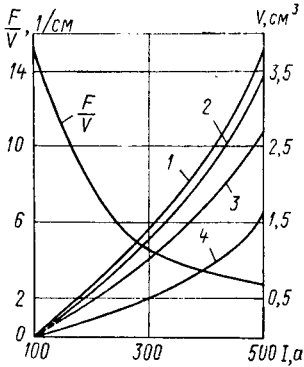


Рис. II.7. Изменение размеров сварочной ванны в зависимости от силы сварочного тока при различном времени сварки

1 — 30 сек; 2 — 20 сек; 3 — 10 сек; 4 — 5 сек

$k_{O_2}$  — коэффициент, определяемый из опытных результатов, в  $\frac{\Gamma \cdot 10^{-4}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек} \cdot \%}$ ;

22,2 — перерасчетная величина, полученная из отношения  $\frac{100}{\gamma_{Ti}}$ , где  $\gamma_{Ti}$  — плотность титана в  $\text{г/см}^3$ .

Экспериментально полученные значения  $\frac{F}{V}$  при этих исследованных режимах проплавления титановой пластины толщиной 14 мм приведены на рис. II.7. При малой силе тока ( $\sim 100 \text{ a}$ ) ванна была очень неглубокой, со значениями  $\frac{F}{V} \approx 10$ . При режимах, сходных с обычными сварочными, т. е. при нормальных размерах ванны, это отношение равно примерно 2—5.

Аналогичная линейная зависимость  $\Delta N_2$  от  $N_2$  (при несколько отличающейся величине  $k_{N_2}$  по отношению к  $k_{O_2}$ , получена и для поглощения азота.

Применительно к каплям отношение поверхности к объему (массе) растет с уменьшением их диаметра. Так, для капель расплавленного железа и титана, принятых по форме в виде правиль-



ных шариков, в табл. II.3 приведены некоторые типовые характеристики. Расчет проведен упрощенно, исходя из одинаковой производительности расплавления электродного металла, для всех случаев принятой в 2400 г/ч (т. е. применительно к дуговой сварке плавящимся электродом для силы сварочного тока  $I_{св} = 240$  а и коэффициента расплавления  $k_p = 10$  г/а·ч). Принципиальных изменений основных расчетных величин от принятых упрощений по режиму и значению  $k_p$  для стали и титана происходить не должно.

Как следует из сопоставления рис. II.7 и отношения  $\frac{F}{V}$  в табл. II.3, для ка-

пель это отношение в целом в 5—7 раз больше, чем в ванне. Учитывая и заметное увеличение скоростей реакций при повышении температуры, а также то, что средняя температура капель значительно превышает среднюю температуру металла в сварочной ванне (см. § II.1), следует ожидать, что в каплях, особенно малых размеров, у которых  $\frac{F}{V}$  растет,

приближение к равновесию должно осуществляться значительно быстрее. Это обстоятельство в отношении процесса взаимодействия водорода с каплями расплавленного металла экспериментально подтверждено исследованиями Г. М. Григоренко и В. О. Лакомского [15].

Т а б л и ц а II.3  
Поверхности и объемы расплавленных капель в зависимости от их размера

Число капель $n$ в секунду	Время* существования капли в сек	Вес $G$ капли в г		Объем $V$ капли в см <sup>3</sup>		Диаметр $D$ капли в см		Поверхность $F$ капли в см <sup>2</sup>		Отношение $\frac{F}{V}$ в 1/см		Отношение $\frac{F}{G}$ в см <sup>2</sup> /г	
		Fe	Ti	Fe	Ti	Fe	Ti	Fe	Ti	Fe	Ti	Fe	Ti
1	1,0	0,66	0,66	0,09	0,146	0,56	0,66	0,98	1,37	10	9,5	1,5	2,0
5	0,2	0,13	0,13	0,02	0,03	0,32	0,38	0,32	0,46	16	15	2,5	3,5
10	0,1	0,066	0,066	0,009	0,015	0,26	0,30	0,21	0,28	23	20	3,1	4,2
50	0,02	0,013	0,013	0,002	0,003	0,14	0,18	0,07	0,10	35	33	5,5	7,7

\* Время существования рассчитано как время, необходимое для расплавления металла электрода в объеме, равном объему капли. По исследованиям А. А. Ерохина [22], фактическое время существования капли на электроде значительно больше вследствие отрыва от торца не всего расплавленного металла, а только его некоторой части.

Из рассмотренного следуют некоторые рекомендации применительно к выбору сварочных материалов, например по составу шлаков и газов, а также установлению необходимого количества раскислителей. Так, для минимального изменения состава металла по какому-либо элементу  $Me$  за счет взаимодействия со сварочными газами и особенно шлаками необходимо, чтобы их состав был максимально приближен к равновесному состоянию по реакциям с этим элементом. Это определяется как концентрацией соединений этого элемента  $Me_nX_m$  (где  $X$  — элемент неметалл, например

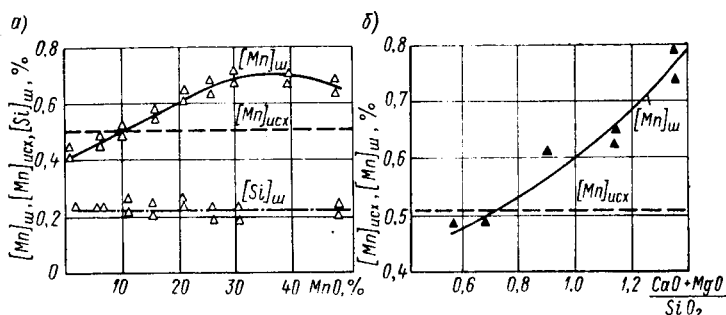


Рис. 11.8. Влияние содержания окислов марганца во флюсе (а) и основности шлака (б) на восстановительно-окислительные процессы  $Mn-MnO$  при взаимодействии металл—шлак

кислород) в сварочных шлаках, так и содержанием в шлаке соединений других элементов, которые могут образовывать в условиях сварки комплексные соединения с  $Me_nX_m$  различной степени стойкости. Тогда такой шлак будет пассивным по отношению к  $Me$ , и начальная (исходная) и конечная концентрации  $Me$  будут примерно одинаковыми.

В качестве примера можно привести реакции марганца при сварке углеродистой стали под силикатными флюсами (материалы К. В. Любавского [38]). На рис. 11.8 приведены сопоставления исходной концентрации марганца в металле —  $[Mn]_{исх}$  и концентрации его в металле шва —  $[Mn]_{ш}$  от концентрации  $(MnO)$  в силикатных шлаках и от расчетной условной степени основности шлака  $\frac{CaO + MgO}{SiO_2}$  при  $(MnO) = const$ .

Как следует из рис. 11.8, а, при постоянной кислотности шлака пассивность флюса — шлака при  $[Mn]_{исх} \approx 0,52\%$  получается при  $(MnO)_ф \approx 10\%$ . Если  $(MnO)_ф < 10\%$ , его оказывается недостаточно в шлаке для равновесия с металлом, содержащим  $[Mn] \approx 0,52\%$ , и происходит окисление части  $[Mn]$  и его конечная концентрация в шве становится меньше исходной. При  $(MnO)_ф > 10\%$  происходит частичное восстановление  $[Mn]$  из флюса за счет реакции марганца с железом [см. формулу (II.11)], и  $[Mn]_{ш} > [Mn]_{исх}$ .

При постоянном  $(\text{MnO})_{\phi} \approx 13\%$  шлак пассивен с металлом, в котором  $[\text{Mn}] = 0,52\%$  при степени основности (по принятой для его расчета формуле, учитывающей только  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$  и  $\text{SiO}_2$  без дополнительных коэффициентов, учитывающих различное взаимодействие основных окислов с  $\text{SiO}_2$ , примерно равной 0,73. При меньшей основности происходит некоторое выгорание металлического марганца, а при более высокой — восстановление марганца из  $(\text{MnO})_{\phi}$  (рис. II.8, б), т. е. такие шлаки не являются пассивными и чем дальше состав шлака от условно равновесного, тем более заметно различие  $[\text{Mn}]_{\text{ш}}$  и  $[\text{Mn}]_{\text{исх}}$ .

В связи с тем что равновесие применительно к температуре кристаллизации шва (будем обозначать ее как температуру плавления —  $T_{\text{пл}}$ ) в сварочных условиях не достигается (см. рис. II.4), для достаточного раскисления металла в этих условиях необходимо количество раскислителей большее, чем равновесное. Для общей реакции раскисления (II.6) константа равновесия выразится так:

$$K = \frac{[\text{Me}''_2\text{O}_y][\text{Me}']^x}{[\text{Me}'_x\text{O}_y][\text{Me}'']^z}, \quad (\text{II.17})$$

где  $[\text{Me}'_x\text{O}_y]$  — концентрация окисла основы металлического сплава  $\text{Me}'$ ;

$[\text{Me}'']$  — концентрация раскислителя  $\text{Me}''$ , имеющего большее сродство к кислороду, чем  $\text{Me}'$ .

Решая формулу (II.17) относительно окисла основы сплава  $\text{Me}'_x\text{O}_y$ , растворенного в металле и тем самым определяющего количество (концентрацию) кислорода в металле, получаем

$$[\text{Me}'_x\text{O}_y] = \frac{[\text{Me}''_2\text{O}_y][\text{Me}']^x}{K[\text{Me}'']^z}. \quad (\text{II.18})$$

Так как концентрация основы сплава  $\text{Me}'$  от таких реакций практически не меняется и остается  $[\text{Me}'] \approx 1$ , а концентрация окисла раскислителя  $\text{Me}''_2\text{O}_y$ , который обычно мало растворим в металле и удаляется в шлак, не зависит от концентраций  $\text{Me}'_x\text{O}_y$  и  $\text{Me}''$ , его значение применительно к формуле (II.18) вводят в постоянную. Тогда

$$[\text{Me}'_x\text{O}_y] = \frac{1}{K'[\text{Me}'']^z} \text{ или } [\text{Me}'_x\text{O}_y][\text{Me}'']^z = \frac{1}{K} = \text{const},$$

т. е. произведение концентраций окисла основы сплава на концентрацию раскислителя в степени, определяемой стехиометрическими коэффициентами, является при равновесии постоянной величиной, которая, как и константа равновесия, определяется температурой и давлением\*. На рис. II.9 эта зависимость показана

\* Для конденсированных твердой и жидкой фаз влияние давления на величину константы равновесия пренебрежимо мало. Поэтому оно принимается во внимание только при определении констант реакций с участием газовой фазы.

в виде симметричной гиперболы 1 — для случая, когда  $x = y = z = 1$  (например, для реакции раскисления  $\text{FeO} + \text{Mn} = \text{MnO} + \text{Fe}$ ), а в виде гиперболы 2 — для случая, когда  $x = y = \frac{z}{2} = 1$  (например, для реакции  $2\text{FeO} + \text{Si} = \text{SiO}_2 + 2\text{Fe}$ ).

Для экзотермических реакций раскисления (в том числе при раскислении FeO и марганцем, и кремнием) с повышением температуры для получения той же степени раскисления кривые сдвигаются вправо, т. е. требуется большая концентрация раскислителя.

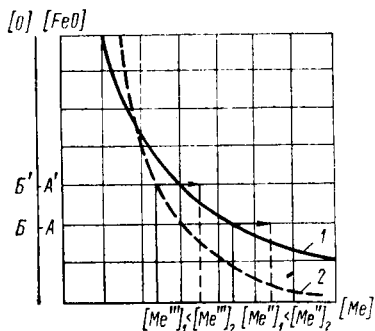


Рис. II.9. Схема равновесных соотношений концентраций растворенных в металле оксида и раскислителя

но к равновесию при более высокой температуре, для получения такой же степени раскисления потребуется некоторая другая концентрация раскислителя, например  $[\text{Me}'' ]_2 > [\text{Me}'' ]_1$ . Это показано на рис. II.9 стрелкой.

Аналогично будет проходить и раскисление кремнием, т. е. на рисунке соответственно это показано концентрациями  $[\text{Me}'' ]_1$  и  $[\text{Me}'' ]_2$  при сохранении такой же зависимости  $[\text{Me}'' ]_2 > [\text{Me}'' ]_1$ . Так, если рассчитать равновесные значения раскисления FeO кремнием по зависимости

$$\lg K_{\text{Si}} = \lg [\text{FeO}]^2 [\text{Si}] = - \frac{43\,930}{T} + 20,34, \quad (\text{II.19})$$

то для получения  $\sim 0,02\%$   $\text{O}_2$  в металле при  $T = T_{\text{пл}}$  требуется несколько менее  $0,05\%$  Si. В сварочных условиях такое содержание кислорода может быть получено при  $\text{Si} \approx 0,25\%$  (в случае даже дополнительного содержания  $\sim 1\%$  Mn). Это примерно отвечает равновесию не при  $T = T_{\text{пл}}$ , а при  $T \approx 1650^\circ \text{C}$ , т. е. на  $150^\circ$  выше  $T_{\text{пл}}$ .

Таким образом, задавая какие-то количества раскислителей в сварочных материалах (проволоке, электродных покрытиях и т. д.), необходимо учитывать, что после раскисления должны остаться такие количества растворенного в металле раскислителя,

которые по концентрациям должны быть выше равновесных. При этом следует учитывать, что при таком избыточном количестве раскислителя он в металле швов будет выступать как легирующий элемент, влияющий на свойства металла шва.

Исследования кинетики процессов взаимодействия металла с окружающей средой при сварке являются достаточно сложными, в связи с чем ряд вопросов не изучен и количественные зависимости не установлены. И хотя это не позволяет учитывать их количественно (расчетом) при выборе и разработке сварочных материалов, но знание общих закономерностей позволяет сокращать объем проводимых экспериментальных проверок.

### § II.3. Примеры взаимодействия металла с газообразным кислородом при различных способах сварки

Прямое взаимодействие металла с газообразным кислородом имеет место при многих способах сварки плавлением. Так, при газовой сварке в пламени сжигаемого горючего газа всегда имеется свободный кислород, который может взаимодействовать с металлом.

При дуговой сварке плавящимся голым электродом (голой электродной проволокой) без защиты от воздуха или в среде защитных технических газов всегда имеется в пространстве, контактирующем с расплавленным металлом, большее или меньшее количество газообразного кислорода. Даже при сварке в вакууме, например дуговой, импульсно-плазменной и электроннолучевой, необходимо учитывать возможность реакций металла со свободным кислородом газовой фазы.

Рассмотрим некоторые количественные зависимости взаимодействия металла при сварке с газовой фазой, содержащей кислород.

Как уже указывалось в § II.1, направление реакций взаимодействия типов (II.3), (II.4) зависит от соотношений парциального давления кислорода в газовой фазе  $\{p_{O_2}\}$  и упругости диссоциации окислов элемента (основы сплава и имеющихся в нем легирующих элементов, примесей) —  $p_{O_2}$ ,  $p'_{O_2}$ .

Значения упругости диссоциации окислов различных элементов в чистом виде приведены на рис. II.2, в котором выделен обычный для сварки диапазон температур.

При наличии элемента в растворе оценка влияния его концентрации на изменение упругости диссоциации окислов может быть осуществлена по формуле (II.9), а при наличии окислов — и с учетом формулы (II.10).

Значит для решения вопроса о направлении реакции взаимодействия необходимо оценить и возможные значения давления свободного кислорода в газовых фазах при различных способах сварки.

Легче всего произвести соответствующие расчеты, когда состав газов определяется различными способами его регулировки и температурными условиями. Это имеет место, например, в условиях газовой сварки. Рассмотрим наиболее простой случай водородно-кислородного пламени и наиболее распространенный — ацетилено-кислородного пламени, по теоретическим разработкам А. Н. Шашкова [72].

Из возможных реакций горения водорода в кислороде (водородно-кислородной смеси, поступающей через сварочную горелку) при температурах до  $4500^{\circ}\text{C}$ , по расчетам И. И. Фрумина [68], наиболее вероятна такая:



с константой

$$K_c = \frac{[\text{H}_2\text{O}]^2}{[\text{H}_2]^2 [\text{O}_2]} \quad \text{или} \quad K_p = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^2}{p_{\text{H}_2}^2 p_{\text{O}_2}}, \quad (\text{II.21})$$

зависимость которой от температуры выражается формулой

$$\lg K_p (\text{II. 20}) = \frac{26300}{T} - 6,1. \quad (\text{II.22})$$

Как следует из обратимости реакции (II.20), в продуктах горения должны быть и  $\text{H}_2\text{O}$ , и  $\text{H}_2$ , и  $\text{O}_2$ , соотношения между которыми определяются исходными соотношениями между поступающими в горючую смесь  $\text{H}_2$  и  $\text{O}_2$  и константой реакции, определяемой температурой (так как давление смеси  $p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{H}_2} + p_{\text{O}_2}$  практически равно  $1 \text{ кг/см}^2$ ). При этом парциальное давление кислорода в газовой смеси

$$p_{\text{O}_2} = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^2}{p_{\text{H}_2}^2 K_p (\text{II. 20})}. \quad (\text{II.23})$$

Так как для реакций типа (II.5) константа  $K_{C_{\text{MeO}}} = \text{O}_2$  и  $K_{p_{\text{MeO}}} = p_{\text{O}_2}$ , то для условий равновесия  $p_{\text{O}_2}$  может быть заменено  $K_{\text{MeO}}$ . Например, для реакции окисления железа



температурная зависимость константы равновесия может быть определена из уравнения

$$\lg K_{p_{\text{FeO}}} = -\frac{28050}{T} + 1,47 \lg T - 0,425 \cdot 10^{-3} T^2 + 2,8. \quad (\text{II.25})$$

Для условий газовой сварки плавлением, приняв для расчета температуру расплавленного металла  $\sim 1600^{\circ}\text{C}$  ( $1873^{\circ}\text{K}$ ), получим численное значение  $K_{p_{\text{FeO}}} \approx -7,825$  (что равно значению  $p_{\text{O}_2} = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ кг/см}^2$ ).

Тогда можно найти соотношения водорода ( $p_{\text{H}_2}$ ) и паров воды ( $p_{\text{H}_2\text{O}}$ ), при которых эта смесь будет равновесна с реакцией окис-

ления железа при  $1600^\circ \text{C}$  (т. е. когда  $p_{\text{O}_2} = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ кг/см}^2$ ) из равенства

$$K_{p_{\text{FeO}}} K_{p_{(11.20)}} = \left( \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2}} \right)^2.$$

Логарифмируя, получаем

$$\lg K_{p_{\text{FeO}}} + \lg K_{p_{(11.20)}} = 2 \lg \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2}}.$$

Подставляя численные значения для  $T = 1873^\circ$  ( $\lg K_{p_{\text{FeO}}} = -7,825$  и  $\lg K_{p_{(11.20)}} = 8,065$ ), получаем  $\lg \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2}} = \frac{8,065 - 7,825}{2} = 0,12$ .

Так как 0,12 является логарифмом числа 1,32, имеем

$$\lg \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2}} = \lg 1,32 \text{ или } \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2}} = 1,32.$$

Пренебрегая малым количеством кислорода ( $p_{\text{O}_2} = 1,6 \times 10^{-8} \text{ кг/см}^2$ ), получаем сумму  $p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{H}_2} = 1 \text{ кг/см}^2$ . Представив долю водорода в виде  $x$  и долю паров воды  $(1 - x)$ , получим  $\frac{1-x}{x} = 1,32$  или  $x = 0,43$ .

Таким образом, газовая фаза, равновесная с раствором расплавленного железа, насыщенным окислом FeO, при температуре  $\sim 1600^\circ \text{C}$  будет иметь состав:  $p_{\text{H}_2} = [\text{H}_2] = 43\%$ ;  $p_{\text{H}_2\text{O}} = [\text{H}_2\text{O}] = 57\%$  при  $p_{\text{O}_2} = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ кг/см}^2$ .

Растворимость в железе окисла FeO зависит от температуры и описывается уравнением

$$\lg [\% \text{O}] = -\frac{6320}{T} + 2,734. \quad (11.26)$$

Результаты расчета приведены в табл. II.4.

В соответствии с уравнениями (II.7) — (II.10) при не насыщенном окислом растворе железа получим

$$p'_{\text{O}_2\text{FeO}} = p_{\text{O}_2\text{FeO}} \left( \frac{[\% \text{FeO}]}{[\% \text{FeO}]_{\text{max}}} \right)^2.$$

Если принять за допустимое количество кислорода в сварном шве  $\sim 0,045\%$  (т. е.  $\sim 1/5$  от максимального насыщения при  $\sim 1600^\circ \text{C}$ , равного, согласно табл. II.4,  $0,231\%$ ), то равновесная такому раствору упругость диссоциации будет  $p'_{\text{O}_2} = 6,4 \times 10^{-8} \text{ кг/см}^2$ . Применительно к этому значению концентрации закиси железа в железе ( $\lg p'_{\text{O}_2} = \lg K_{p_{\text{FeO}}} = -9,184$ ) равновесная газовая фаза будет  $p_{\text{H}_2} = 79\%$ ;  $p_{\text{O}_2} = 21\%$  и  $p'_{\text{O}_2} = 6,4 \times 10^{-8} \text{ кг/см}^2$ .

Практически применявшаяся регулировка водородно-кислородного пламени с соотношением горючего газа к кислороду 4 : 1 давала реакцию



т. е. в продуктах реакции было 50%  $\text{H}_2$  и 50%  $\text{H}_2\text{O}$ . Такая газовая фаза была бы восстановительна по отношению к насыщенному

Т а б л и ц а II.4

Растворимость кислорода в железе

Температура		Растворимость в жидком железе в % вес.	
°C	°K	O	FeO
1540	1813	0,175	0,786
1600	1873	0,231	1,040
1800	2073	0,485	2,180
2000	2273	0,871	3,920
2300	2573	1,880	8,500

закисью железа раствору железа (равновесная смесь 43%  $\text{H}_2$ ; 57%  $\text{H}_2\text{O}$ ), но могла бы окислять железо до содержания в нем кислорода около 0,045%.

Принимая для более сложного состава газовой смеси ( $\text{H}_2$ ;  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ ) общее парциальное давление свободного кислорода согласно схеме на рис. II. 10 и решая систему уравнений с парциальными давлениями при отношении

суммы  $\frac{\text{CO} + \text{CO}_2}{\text{H}_2 + \text{H}_2\text{O}} = \frac{2}{1}$ , А. Н. Шашков определил для ацетилено-

кислородного пламени соотношение  $\frac{\text{O}_2}{\text{C}_2\text{H}_2} = 1,3$  как равновесное с насыщенным закисью железа раствором железа при  $\sim 1600^\circ\text{C}$ , т. е. при этом  $p_{\text{O}_2} = 1,6 \cdot 10^{-8}$   $\kappa\Gamma/\text{см}^2$ .

Для смеси с соотношением  $\frac{\text{O}_2}{\text{C}_2\text{H}_2} = 1$  парциальное давление кислорода  $p_{\text{O}_2} = 2,2 \cdot 10^{-12}$   $\kappa\Gamma/\text{см}^2$ , т. е. она является восстановительной даже для концентрации кислорода в железе, равной 0,01%.

Общая схема взаимодействия ацетилено-кислородного пламени с различными окислами при температуре  $\sim 1600^\circ\text{C}$ , по А. Н. Шашкову, приведена на рис. II.11. При этом упругости диссоциации чистых окислов легирующих элементов и их насыщенных растворов в основе сплава взяты при максимальной растворимости (т. е. согласно рис. II.2), без учета концентраций легирующих элементов, которые также можно учесть для конкретных условий.

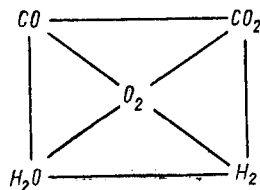


Рис. II.10. Схема равновесного существования системы газов

Хорошее качественное сопоставление полученных расчетом значений соотношений кислорода и ацетилена в пламени с наблюдаемым в практике поведением различных элементов (окисление хрома, марганца, кремния, алюминия, титана при пламени нормальной регулировки; отсутствие окисления хрома при его



концентрациях в сплаве от 5 до 20%, при пламени с небольшим избытком ацетилена) позволяет использовать расчеты, основанные на термодинамическом равновесии, применительно к сварочным условиям.

Несколько сложнее осуществить оценку состава газовой фазы при дуговой сварке плавящимся электродом. В этом случае приходится учитывать при оценке концентраций свободного кисло-



Рис. II.11. Номограммы сопоставления областей различной регулировки ацетилено-кислородного пламени и упругости диссоциации окислов различных элементов при 1580°С

рода и наличие значительного выделения паров металла при сварке. Так, в § II.1 было показано, что при температурах капель расплавленного электродного металла в пределах 2100—2500°С возможно достижение давления паров (суммы давления паров железа, марганца и др.) от 0,25  $\text{кг/см}^2$  до значительных больших значений: например, при режимах, применяемых при сварке под флюсом, — около 0,75  $\text{кг/см}^2$ . Тогда состав газовой фазы, например для случая сварки голым электродом в атмосфере окружающего воздуха, будет определяться как смесь воздуха (приблизненно 0,8  $N_2$  и 0,2  $O_2$ ) и паров металла. Весь предполагаемый диапазон составов газовой фазы в этом случае можно представить в виде табл. II.5.

Если допустить при сварке голыми электродами концентрацию паров в дуговом промежутке от 0,25 до 0,50  $\text{кг/см}^2$  (наиболее

вероятно  $\sim 0,25 \text{ кг/см}^2$ ), то парциальное давление кислорода при этом составляет  $0,15\text{--}0,10 \text{ кг/см}^2$ , т. е.  $1\text{--}1,5 \cdot 10^{-1} \text{ кг/см}^2$ . Как было показано выше, равновесное давление  $p_{O_2}$  для насыщенных растворов при температуре  $\sim 1600^\circ \text{C}$  составляет  $\sim 10^{-8} \text{ кг/см}^2$ , а при более высоких температурах, характерных для дуговой сварки сталей, снижается (см. рис. II.2) до  $10^{-4} \text{ кг/см}^2$ . Во всех случаях получающаяся при сварке голым электродом

Т а б л и ц а II.5  
Возможные варианты смесей воздуха и паров металла

Соотношение в смеси в %		Состав смеси в парциальных давлениях при $p_{\text{общ}} = 1 \text{ кг/см}^2$		
паров	воздуха	пары	$N_2$	$O_2$
0	100,0	0	0,8	0,2
25,0	75,0	0,25	0,6	0,15
50,0	50,0	0,50	0,4	0,10
75,0	25,0	0,75	0,2	0,05
100,0	0	1,00	0	0

в воздухе газовая фаза является окислительной и принципиально может привести к насыщению раствора закисью железа. Однако малое время существования жидкого металла не позволяет достигать этого равновесного значения растворения кислорода, и фактическая его концентрация в каплях ниже, чем при предельном растворении. Естественно, что при большей относительной поверхности металла приблизительно к насыщению должно наблюдаться в большей степени. Это подтверждается и экспериментальными данными [82] о содержании кислорода в металле шва при сварке голым стальным электродом в воздухе:

Диаметр голого электрода в мм . . . . .	6	4	2	1
Содержание кислорода в шве в % . . . . .	0,14	0,302	0,55	0,72

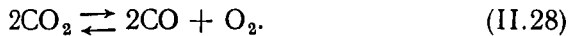
При сопоставлении конечного содержания кислорода в швах с предельным следует учитывать, что в сварочной проволоке (электродах) всегда имеется некоторое количество раскислителей, в частности марганца, которые часть поглощенного при сварке кислорода выводят в шлак, уменьшая его конечное содержание в металле. Подтверждением этого являются эксперименты А. А. Ерохина [23], использовавшего голые электроды с различным содержанием раскислителей. Его результаты приведены в табл. II.6.

Как следует из этих данных, при достаточно большом количестве раскислителей (в частности, кремний и марганец  $\sim 1\%$ ) конечное количество кислорода, фиксируемое в наплавленном металле, уменьшается почти на  $0,12\%$  за счет его удаления раскислителями в шлак. Такой принцип освобождения металла от кислорода, как известно, используется при сварке в защитных газах, в частности в углекислом газе. Струйная защита зоны дуги углекислым газом почти полностью оттесняет воздух, и рас-

Конечное содержание кислорода в наплавленном голым электродом металле при различном составе электрода

Марка электродной проволоки	Примерное количество раскислителей в электроде в %				Количество кислорода в наплавленном металле в %
	C	Si	Mn	Cr	
Св-08	0,1	—	0,5	—	0,150
Св-18ХМА	0,18	0,25	0,6	1,0	0,053
Св-20ХГС	0,2	1,0	1,0	—	0,035

плавленный (и парообразный) металл находится в продуктах диссоциации  $\text{CO}_2$



Константа этой реакции представляется уравнением

$$\lg K_p(\text{II.28}) = \lg \frac{p_{\text{CO}}^2 p_{\text{O}_2}}{p_{\text{CO}_2}^2} = -\frac{29072}{T} + 8,81. \quad (\text{II.29})$$

Состав равновесной смеси газов  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{O}_2$  в зависимости от температуры при общем давлении, равном  $1 \text{ кг/см}^2$ , приведен на рис. II.12. Как следует из графика, в этом случае при температурах капель металла (до  $2600\text{--}2800^\circ \text{K}$ ) парциальное давление кислорода составляет  $\sim 0,1 \text{ кг/см}^2$ , т. е. содержание кислорода в такой смеси только несколько меньше, чем в воздухе. Такая атмосфера является весьма окислительной, как для железа  $p_{\text{O}_2\text{FeO}} \approx 10^{-8} \text{ кг/см}^2$ , так и для других элементов в железных сплавах (Si, Mn, Cr и пр.). Некоторое снижение парциального давления кислорода за счет паров металла (вероятно, меньшее, чем при сварке голым электродом в воздухе в связи со сдуванием паров направленным потоком защитного газа) принципиально не изменяет соотношений, рассмотренных выше. Таким образом, защитная струя  $\text{CO}_2$  почти полностью исключает взаимодействие с металлом азота воздуха, но сохраняет практически почти такой же окислительный характер газовой фазы, как при сварке голым электродом в воздухе. Получаемый окисленный металл необходимо раскислять. Раскисление может осуществляться либо дополнительной обработкой металла шлаком (введением допол-

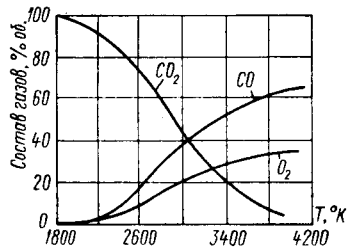


Рис. II.12. Состав равновесной газовой смеси, являющейся результатом диссоциации  $\text{CO}_2$ , в зависимости от температуры

нительного флюса), либо использованием электродной проволоки с достаточным количеством раскислителей. Наибольшее распространение получил второй способ. При этом в качестве раскислителей применяются кремний и марганец, обычно в концентрациях: 0,6—1,0% Si и 1,4—2% Mn. Как правило, конечное содержание кислорода в наплавленном такими электродными проволоками (диаметром  $\sim 2,0$  мм) металле составляет 0,03—0,05%, при содержании 0,3—0,4% Si и 1% Mn. В этом случае потери кремния составляют в среднем  $0,8 - 0,35 = 0,45\%$ , а марганца  $1,7 - 1,0 = 0,7\%$ . Если пренебречь потерями на испарение, то такое количество раскислителей может связать кремний в  $\text{SiO}_2$ :  $0,45 \frac{32}{28} \approx 0,5\% \text{ O}_2$ , и марганец в  $\text{MnO}$ :  $0,7 \frac{16}{55} \approx 0,2\% \text{ O}_2$ , т. е. в сумме  $\sim 0,7\% \text{ O}_2$ . Учитывая частичную потерю этих элементов (особенно марганца, см. табл. II.1) на испарение, можно количество связываемого раскислителями кислорода уменьшить до 0,5—0,55%. Если сравнить это количество (при остаточном кислороде в наплавленном металле 0,03—0,05%, т. е. в среднем 0,04%), то оно почти совпадает с содержанием кислорода при наплавке голым электродом в воздухе (см. стр. 78, при диаметре 2 мм содержание  $\text{O}_2 \approx 0,55\%$ ). Видимо, можно предположить, что потенциально менее окислительная атмосфера при сварке в  $\text{CO}_2$  по сравнению с воздухом ( $p_{\text{O}_2, \text{CO}_2} < p_{\text{O}_2, \text{B}}$ ) компенсируется большими объемами газа защитной струи, взаимодействующей с металлом.

Так, при обычном режиме сварки проволокой диаметром 2 мм при  $I_{\text{св}} = 300 \div 350$  а и расходе газа 1200 л/ч получаем при расчете по кислороду: вес расходуемого  $\text{CO}_2 - 1,20 \cdot 1,96 = 2360$  г/ч; общее количество свободного кислорода — 7,7% вес. ( $\sim 10\%$  об.) соответствует 180 г/ч; переплавлено электродного металла при коэффициенте расплавления  $22 \text{ г/а} \cdot \text{ч} - 325 \cdot 22 \approx 7000$  г/ч; связано кислорода кремнием (при его выгорании  $\sim 0,5\%$ , или 35 г/ч) — 40 г/ч; связано марганцем (также при выгорании  $\sim 0,5\%$ ) — 10,5 г/ч; осталось кислорода в виде приращения в железе (приняв приращение  $\Delta \text{O}_2 = 0,02\%$ ) —  $7000 \cdot 0,0002 \approx 1,5$  г/ч; итого:  $40 + 10,5 + 1,5 = 52$  г/ч. Отношение количества кислорода, попавшего в металл, к общему количеству свободного кислорода в защитной струе, если бы она была полностью использована на диссоциацию  $\text{CO}_2$  и могла бы вся прореагировать с металлом:  $\frac{52}{180} \approx 0,3$ , или 30%.

Однако фактически окисление металла осуществляется не только свободным кислородом, но и прямой реакцией  $\text{CO}_2$  с железом (марганцем, кремнием). Поэтому прореагировавшую с металлом часть газа следует считать равной не 30%, а несколько менее, вероятно, 20—25%. Из проведенного расчета следует, что при производительности расплавления 7000 г/ч с металлом реагирует  $240 - 300$  л ( $\sim 270$  л) защитного газа, т. е.  $\frac{270}{7000} \approx 0,04$  л/г или

40 см<sup>3</sup>/г (или ~56 см<sup>3</sup>/г при расчете на 30% расходующего СО<sub>2</sub>).

Проведем расчет и для сварки голым электродом в воздухе.

В случае 100% использования кислорода воздуха на окисление металла включаемый в реакцию с металлом столб воздуха вокруг электрода может быть оценен из следующих основных положений. Количество свободного кислорода в воздухе  $\sim \frac{1}{5}$ , т. е. объем воздуха, участвующего в процессе, в 5 раз больше объема прореагировавшего с металлом кислорода; при полном использовании кислорода воздуха из всего прореагировавшего столба воздуха диаметром  $D$  (при голым электродом диаметром  $d$ ) приращение кислорода в металле  $\Delta [O_2]_m$  связано с прореагировавшим воздухом соотношением

$$\frac{\pi D^2}{4} l \gamma_a \frac{1}{5} = \frac{\pi d^2}{4} l \gamma_m \Delta [O_2]_m, \quad (II.30)$$

где  $\gamma_a$  и  $\gamma_m$  — плотности воздуха и металла в г/см<sup>3</sup> ( $\gamma_a = 1,29 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>;  $\gamma_m = 7,85$  г/см<sup>3</sup>);

$l$  — длина сжигаемого электрода, равная высоте столба воздуха, охватывающего электрод и реагирующего с расплавленным металлом.

Тогда при принятых допущениях

$$D = d \sqrt{\frac{5\gamma_m}{\gamma_a} \Delta [O_2]_m}. \quad (II.31)$$

Для  $d = 2$  мм = 0,2 см получаем  $D \approx 2,5$  см. При этом объем воздуха  $V$  на 1 г расплавленного металла равен

$$V \approx \frac{\pi D^2}{4} l_{G=1}, \quad (II.32)$$

где  $l_{G=1}$  — длина электрода, соответствующая 1 г расплавляемого металла (при  $d = 2$  мм  $l_{G=1} \approx 4$  см).

В этом случае объем прореагировавшего с металлом воздуха равен  $V = 3,14 \cdot 2,5^2 \approx 20$  см<sup>3</sup>/г, т. е. в 2—3 раза меньше, чем при расчете по струе защитного газа СО<sub>2</sub>, хотя применительно к воздуху расчет производился на максимальное (полное) использование кислорода на окисление, тогда как фактическое его реагирование будет менее полным. Хотя это приведет к некоторому увеличению значения  $V$  (см<sup>3</sup>/г), однако вряд ли можно предположить столь большее вовлечение воздуха в реакционное пространство дугового разряда при обычных режимах сварки, которое было получено ранее расчетом для СО<sub>2</sub>.

Применяемые в практике сварки другие газы, в частности защитные при дуговой сварке неплавящимся и плавящимся электродами — аргон, гелий и их смеси, также в той или иной степени содержат кислород. Несмотря на то что их количества в ряде

случаев и не очень значительны, этот кислород может определенным образом влиять на окисление металла. Так, например, аргон имеет чистоту в зависимости от сорта 99,5%—99,95% при наличии примесей азота, кислорода и паров воды. Даже в достаточно чистом аргоне обычно содержится до 0,005%  $O_2$ . При таком его содержании в условиях сварки парциальное давление кислорода в газовой фазе составляет  $5 \cdot 10^{-5}$   $кГ/см^2$ , т. е. такая среда является потенциально окислительной и для железа ( $p_{O_2_{FeO}} = 10^{-8} \div \div 10^{-4}$   $кГ/см^2$ ), и для ряда других элементов, упругость диссоциации окислов которых еще меньше (Si, Mn, Cr, Ti и др.). Поэтому технические сорта аргона, применяемые при сварке в качестве инертных газов, фактически окислительны по отношению к металлу. Однако их окислительная способность ограничивается малыми количествами содержащегося в них кислорода.

Как было сказано, выше, парциальное давление кислорода в воздухе и в диссоциированном в дуге  $CO_2$  составляет  $\sim 10^{-1}$   $кГ/см^2$ . В аргоне оно может быть  $\sim 5 \cdot 10^{-5}$   $кГ/см^2$ , т. е. в 2000 раз меньше. Известно, что элементарные акты химических реакций окисления определяются количеством «столкновений» молекул (атомов) кислорода с металлом и распределением их кинетической энергии, являющейся следствием температурных условий. Распределение кинетической энергии приближенно можно считать для условий сварки не зависящим от состава газа (температуры газов в реакционной зоне дуги примерно одинаковы). Тогда, пока не произойдет приближение к насыщению металла кислородом, будут действовать закономерности, определяемые формулой (II.16). В этом случае приращение кислорода в металле зависит от коэффициента  $k_{O_2}$ , относительной поверхности  $\frac{F}{V}$  и времени  $\tau$  взаимодействия жидкого металла с газовой фазой. Коэффициент  $k_{O_2}$  зависит от свойств металла и для конкретного сплава при  $T = \text{const}$  может считаться постоянным. Относительная поверхность  $\frac{F}{V}$  определяется способом и режимом сварки, что не может изменять  $\Delta O_2$  на целые порядки. Время также определяется способом и режимом сварки и изменяется в еще меньшей степени, чем отношение  $\frac{F}{V}$ . Поэтому для оценки результатов окислительного воздействия сварочной газовой среды для конкретного свариваемого металла в сопоставимых условиях (например, для дуговой сварки неплавящимся или плавящимся электродом) можно принять концентрацию кислорода в газовой фазе или его парциальное давление.

Так, в приведенном выше расчете уменьшение количества кислорода в аргоне по сравнению с воздухом (или диссоциированным в дуге  $CO_2$ ) в 2000 раз должно примерно во столько же раз снижать и скорость приращения количества кислорода в металле. Если при сварке в воздухе голым электродом из технически чи-

стого железа степень окисления в зависимости от диаметра составляет, согласно данным на стр. 78,  $\Delta O_2 \approx 0,15 \div 0,7$  (количеством кислорода в металле до сварки, измеряемым сотыми долями процента, пренебрегаем), то при защите аргоном приращение будет в 2000 раз меньше, т. е. будет измеряться тысячными долями процента, обычно анализом не определяемыми. Поэтому считается, что при сварке железа и некоторых других металлов и сплавов аргон применяемой чистоты не окислителен.

Однако, если при защите аргоном расплавлять дугой металл с большим сродством к кислороду [косвенно это будет отвечать увеличению  $k_{O_2}$  в формуле (II.16)], то и такая газовая фаза может быть окислительной. Так, при аргоно-дуговой сварке титана и его сплавов замечается повышение содержания кислорода в металле шва по сравнению с его исходным содержанием в участвующих в формировании шва металлах. Например, при дуговой сварке неплавящимся электродом в среднем (в зависимости от толщины свариваемого металла и режима сварки) это приращение кислорода составляет 0,005—0,01%, при сварке плавящимся электродом оно несколько больше — 0,01—0,02%.

Произведем для оценки весьма упрощенный расчет. На исследованных режимах ручной аргоно-дуговой сварки титана неплавящимся электродом с подачей присадочного металла расход газа защитной струи обычно составляет 15—20 л/мин (примем  $\sim 1$  м<sup>3</sup>/ч). При этом количество наплавляемого металла равно 0,3—0,6 кг/ч. В струе аргона, подаваемого в дугу с интенсивностью 1 м<sup>3</sup>/ч, при содержании в нем 0,005% O<sub>2</sub>, будет  $\sim 0,1$  г/ч O<sub>2</sub>. Учитывая, что не вся струя контактирует с металлом, примем для оценки те значения, которые получены выше по расчету CO<sub>2</sub> (20—30% от всего количества газа в струе). Тогда ожидаемое количество кислорода, которое может прореагировать с металлом и дать приращение в нем, составит 0,02—0,03 г/ч. Пересчитывая эти значения на вес металла (300—600 г/ч), получаем возможное приращение кислорода в металле от 0,003 до 0,01%, т. е. такое, которое наблюдается в практике.

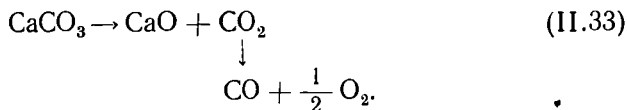
Аналогичный расчет при аргоно-дуговой сварке титана плавящимся электродом, при расходе газа в струе 50—60 л/мин (т. е. в 3—4 раза больше, чем при неплавящемся) и увеличении количества расплавляемого металла в 2—3 раза, дает приращение кислорода в металле в 1,5—2 раза большее, чем на режимах сварки неплавящимся электродом, т. е.  $\Delta [O_2] = 0,005 \div 0,020\%$ . Эти значения также примерно совпадают с экспериментально определенными при сварке титана этим способом ( $\Delta [O_2] = 0,01 \div 0,02\%$ ).

Таким образом, если при сварке железа в аргоне (по сопоставлению с воздухом и CO<sub>2</sub> по парциальному давлению кислорода в газовой фазе) можно ожидать приращение кислорода порядка 0,001%, то при сварке значительно более активного титана это приращение составляет от тысячных долей процента до величины порядка 0,01%, что в целом согласуется с общими качествен-

ными представлениями по возможным процессам окисления и оцененным относительным объемам реагирующего с металлом газа защитной струи.

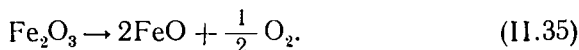
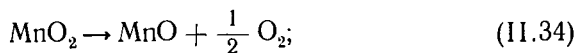
Проведенные выше ориентировочные расчеты из различных исходных положений, давшие примерно одинаковый количественный результат, позволяют использовать (конечно весьма упрощенную) схему считать достаточно достоверной.

С этих же позиций можно рассматривать и взаимодействие металла с большинством электродных покрытий материалов, которые в условиях сварки могут выделять свободный кислород. Так, при покрытиях карбонатно-флюоритного типа к такому эффекту приводит диссоциация мрамора (или известняка) по схеме



При этом максимальное количество освобождающегося кислорода, если пренебречь возможностью дополнительного отбора кислорода от CO (что практически возможно только при наличии значительного количества элементов с заметно большим сродством к кислороду, чем у углерода), составляет 16% от веса мрамора.

Возможно выделение кислорода и при покрытиях других типов, например рудноокислых. Так, применяемые в них высшие окислы марганца ( $\text{MnO}_2$  в пиролюзите) и железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , например в гематите) покрытия марки ЦМ-7 при высоких температурах разлагаются с выделением кислорода:



Выделенный кислород идет и в этом случае на окисление металла (основы свариваемого сплава, легирующих его элементов и раскислителей).

Заканчивая рассмотрение влияния кислорода, следует отметить, что оно не ограничивается окислением металла, как правило, приводящего к ухудшению его качества. Кислород влияет и на ряд других характеристик процесса. Так, в сплавах на железной основе растворенный кислород уменьшает растворимость водорода [42, 78], в сплавах на медной основе он усиливает отрицательное влияние водорода.

Весьма важным оказывается влияние кислорода на некоторые технологические характеристики. Известно, например, что кислород для ряда металлов, в том числе и железа, сильно снижает поверхностное натяжение, являющееся важным фактором в формировании и отрыве капель от электрода при дуговой сварке. Снижение поверхностного натяжения (межфазного на границе



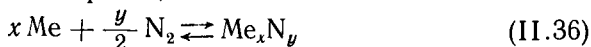
металл—шлак) приводит к более мелкокапельному переносу металла в дуге, и хотя это, как правило, является благоприятным для формирования шва, но одновременно создает более развитую поверхность (см. табл. II.3) и способствует более интенсивному взаимодействию металла с окружающей средой, в частности с газами.

Кроме того, процессы интенсивного окисления металла, протекающие с выделением тепла, могут повышать температуру металла, главным образом капель. По некоторым материалам [22] такое повышение средней температуры при сварке сталей составляет около 100° С. Повышение температуры, как известно, также влияет на интенсивность тех или иных реакций.

### § II.4. Взаимодействие металла с азотом, водородом и другими газами

В ряде металлов азот практически нерастворим (медь, никель, серебро, золото) и может при их сварке использоваться как защитный инертный газ. С другими металлами — железом, титаном, алюминием и их сплавами — он может активно взаимодействовать, и его влияние на их свойства очень значительно. С некоторыми из них, например с титаном, при сварочных температурах азот, взаимодействуя, образует химические соединения — нитриды. В других, например в железе, он растворяется, образуя жидкие и твердые растворы внедрения, причем растворимость азота в твердом железе с понижением температуры уменьшается, и избыточные количества его выпадают из раствора в виде нитридов ( $Fe_2N$ ,  $Fe_4N$ ). Железный угол диаграммы состояния Fe—N приведен на рис. II.13.

Взаимодействие азота с титаном (и другими металлами, дающими с ним химические соединения при  $T > T_{пл}$ ), определяется возможностью азотирования по тем же принципам, которые рассмотрены в предыдущем параграфе для окисления. Тогда характерными являются обратимые реакции типа



с константами равновесия, определяемыми упругостью диссоциации нитридов  $Me_x N_y$ . При  $\{p_{N_2}\}_{э. ф} > p_{N_2, Me_x N_y}$  происходит азотирование, а при  $p_{N_2, Me_x N_y} > \{p_{N_2}\}_{э. ф}$  — диссоциация нитридов и удаление азота.

Азотирование титана в аргоно-азотной смеси при сварке в камерах с контролируемой атмосферой дает принципиально такие же зависимости, как для окисления [см. формулу (II.16)]. И в этом случае приращение азота  $\Delta [N]$  в металле подчиняется зависимости вида [74]

$$\Delta [N] = k_{N_2} \left( \frac{F}{V} \right) t N_2 \cdot 22,2\%, \quad (II.37)$$

где  $N_2$  — содержание азота в газовой фазе в % об.

При этом коэффициент  $k_{N_2}$  по некоторым материалам (М. Д. Щипков) в 2—3 раза меньше, чем аналогичный коэффициент  $k_{O_2}$  для кислорода, а по другим данным (В. Я. Гончаров)  $k_{N_2} \approx k_{O_2}$ . По общим соображениям, по оценке степеней диссоциации кислорода и азота при сварочных температурах, сравнению тепловых эффектов реакций титана с кислородом и азотом, интенсивность окисления титана должна быть несколько большей, чем интенсивность его азотирования.

Наличие в металле азота весьма отрицательно сказывается на

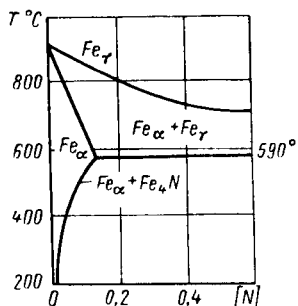


Рис. II.13. Железный угол диаграммы состояния Fe—N

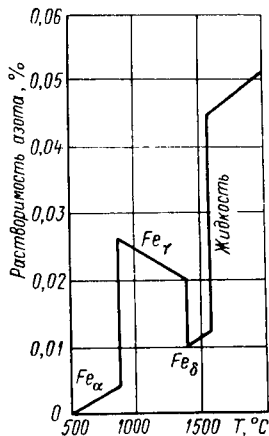


Рис. II.14. Зависимость растворимости азота в железе от температуры

свойствах титана и его сплавов, приводя к резкому снижению пластичности, ударной вязкости и сопротивляемости хрупким разрушениям. Поэтому его содержание стремятся ограничивать и в металле для сварных конструкций, и в присадочных сварочных материалах, и в составе применяемых для сварки защитных газов. Обычно допустимое содержание азота в титановых швах устанавливается (в зависимости и от других примесей внедрения) примерно 0,05%.

В железных сплавах химические соединения с азотом (нитриды железа) устойчивы только при температурах значительно ниже температуры плавления (рис. II.13). При температурах жидкого металла азот физически растворяется в железе и его сплавах.

Общий характер растворимости азота в железе при  $\{p_{N_2}\} = 1 \text{ кг/см}^2$  приведен на рис. II.14. В таких металлах растворимость азота подчиняется зависимостям:

$$[N] = k_1 p_N; \quad (II.38)$$

$$[N] = k_2 \sqrt{p_{N_2}}, \quad (II.39)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  — коэффициенты, зависящие от температуры;  
 $p_N$  и  $p_{N_2}$  — парциальные давления в газовой фазе соответственно атомарного и молекулярного азота.

Формула (II.38) указывает на подчинение растворимости азота закону Сиверта. При процессах металлургического производства стали это подтверждается экспериментально [42]. Однако при сварочных процессах, по японским материалам [83], имеет место отклонение от такой зависимости, и при малых парциальных давлениях азота в смеси его конечное содержание в металле значительно превышает ожидаемые количества, рассчитанные по формуле Сиверта со значениями коэффициента  $k_2$  из экспериментов, выполненных при больших парциальных давлениях азота. Попробуем качественно объяснить эту аномалию поглощения азота.

Азот, который практически не диссоциирует на атомы в условиях производства стали, при сварочных температурах может заметно диссоциировать по реакции



с константой

$$K_p (\text{II.40}) = \frac{p_{\text{N}}^2}{p_{\text{N}_2}} = -\frac{37000}{T} + 6. \quad (\text{II.41})$$

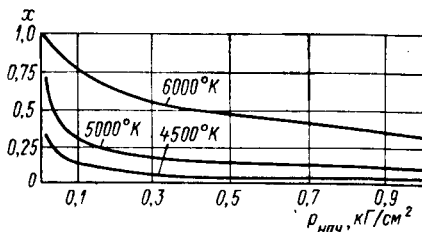


Рис. II.15. Зависимость степени диссоциации  $x$  азота от начального парциального давления  $p_{\text{нач}}$  молекулярного азота

Тогда в смеси при степени диссоциации  $x < 1$  будет общее количество частиц  $(1 - x) \text{N}_2 + 2x \text{N}$ . При этом парциальные давления молекулярного и атомарного азота при их общем давлении  $p$  будут соответственно

$$p_{\text{N}} = \frac{2x}{1 - x + 2x} p = \frac{2x}{1 + x} p \quad \text{и} \quad p_{\text{N}_2} = \frac{1 - x}{1 + x} p.$$

В этом случае константу можно выразить так:

$$K_p (\text{II.40}) = \frac{\left(\frac{2x}{1+x} p\right)^2}{\frac{1-x}{1+x} p} = \frac{4x^2 p}{1-x^2},$$

откуда степень диссоциации

$$x = \sqrt{\frac{K_p (\text{II.40})}{4p + K_p (\text{II.40})}}. \quad (\text{II.42})$$

Анализ уравнения (II.42) показывает, что чем меньше общее давление смеси молекулярного и атомарного азота, тем больше степень диссоциации молекулярного азота. На рис. II.15 приведены графически результаты расчетов степени диссоциации азота при начальном давлении молекулярного азота  $p_{\text{нач}} = 1 \div 0,01 \text{ кг/см}^2$ . Из графиков следует, что при относительно небольшом количестве

азота в газовой фазе (до  $\sim 0,05 \text{ кг/см}^2$ ) он в относительно большей степени диссоциирован и должен азотировать металл интенсивнее, чем по закону Сивертса. Поэтому при не очень больших концентрациях азота в газовой фазе при сварочных температурах, когда диссоциация азота происходит в большей степени, определяющим является азотирование не по формуле Сивертса, а по формуле (II.39), т. е. более интенсивно.

При сварке голым электродом в окружении воздуха наблюдается значительное азотирование, причем аналогично окислению тем большее, чем меньше размер капель металла. Ниже приведены данные [82] о конечном содержании азота в наплавленном голыми электродами металле в зависимости от диаметра электродной проволоки (из малоуглеродистой стали типа Св-08):

Диаметр электрода в мм . . . . .	6	4	2	1
Содержание азота в наплавленном металле в % вес . . . . .	0,105	0,130	0,180	0,218

Если при обычных методах производства стали содержание в них азота, как правило, находится в пределах  $0,005—0,008\%$ , т. е. в пределах его растворимости при нормальных температурах ( $\sim 0,02\% \text{ N}_2$ ), то приведенные количества азота в наплавленном металле вызывают при понижении температуры выпадение нитридов, выявляемых в структуре в виде острых, иглообразных выделений, значительно снижающих пластичность и вязкость металла.

Улучшение свойств металла швов может быть достигнуто либо ограничением поглощения азота при сварке, либо его переводом в менее опасные соединения, в том числе и более благоприятные по геометрической форме выделения в структуре.

Второй путь был предложен коллективом сотрудников Института электросварки им. Е. О. Патона [45] в виде разработанных ими составов специальных электродных проволок, предназначенных для сварки без защиты от воздуха, содержащих достаточное количество раскислителей для удаления кислорода и специальные элементы для частичного удаления азота (по типу раскисления — деазотирование с удалением стойких нитридов  $\text{AlN}$ ,  $\text{TiN}$  и др. в шлак), перевода остающегося азота в твердый раствор и выделения в виде нитридов циркония, алюминия, титана более благоприятной формы, чем нитриды железа. Действительно, составы сварочных проволок марок 20ГСЮТ (ЭП-245) и 15ГСТЮЦ (Эп-439) позволяют несколько деазотировать металл (при диаметре голой проволоки  $\sim 2—2,5 \text{ мм}$ ) конечное содержание азота в металле оказывается на уровне  $0,06—0,09\%$ , а его ударная вязкость возрастает с  $0,8—1 \text{ кг} \cdot \text{м/см}^2$  (при проволоке марки Св-08) до  $3—6 \text{ кг} \cdot \text{м/см}^2$ . Однако этот способ широкого практического применения не получил в связи с имеющимися ограничениями по требованиям к вязкости металла сварных швов, невысокой производительностью сварки и повышенной стоимостью электродной проволоки разработанных составов.

Значительно большее распространение нашли способы сварки, ограничивающие подвод азота воздуха к реакционной зоне — каплям металла и сварочной ванне.

Так, при способах сварки под флюсами-шлаками (дуговая сварка под слоем флюса, электрошлаковая сварка), обычно применяемые при сварке сталей шлаки (на базе окислов кремния, марганца и пр.) достаточно хорошо изолируют металл от воздуха и конечное содержание азота в швах, выполненных этими способами, как правило, составляет около 0,01%, т. е. почти равно исходному содержанию в переплавляемых основном и электродном металлах.

Достаточное ограничение попадания азота воздуха в зону сварки осуществляется и при защите расплавляемого при сварке металла струями защитных газов — активных (обычно  $\text{CO}_2$ , иногда с добавками других газов) и инертных (аргон и т. д.). При хорошей струйной защите конечное содержание азота в металле швов также примерно равно исходному.

Электродные покрытия всех видов (руднокислые, рутиловые, фтористо-кальциевые и целлюлозные) также при их достаточной относительной массе (относительном весе, толщине покрытия на электродном стержне) обеспечивают удовлетворительную защиту реакционного пространства от азота воздуха. Общая закономерность зависимости конечного содержания азота от толщины покрытия (относительного веса  $\frac{G_{эн}}{G_{эс}}$ ) приведена на рис. II.16.

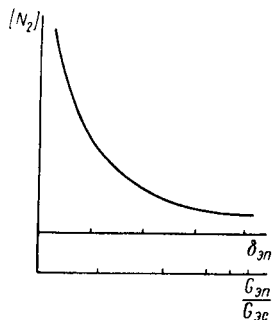


Рис. II.16. Зависимость содержания азота в наплавленном металле от толщины  $\delta_{эн}$  или относительного веса  $\frac{G_{эн}}{G_{эс}}$  электродного покрытия

Из этой зависимости следует, что для ограничения количества поглощаемого металлом азота требуется некоторая достаточная толщина (относительный вес) покрытия. Для различных составов покрытий и средних диаметров электродов (электродных стержней) 4—5 мм удовлетворительная защита получается при толщине покрытия  $\delta_{эн} = 0,8 \div 1,2$  мм на сторону (~20—40% веса покрытия  $G_{эн}$  от веса электродного стержня  $G_{эс}$ ).

Для механизированных методов сварки (главным образом полуавтоматической) Институтом электросварки им. Е. О. Патона разработан ряд составов так называемых порошковых проволок, содержащих в составе порошкового наполнителя флюсы [58]. При сварке они расплавляются и достаточно надежно защищают металл от азота воздуха при относительном весе шлаковых составляющих (относительно металлической части порошковой проволоки) примерно равном 0,10—0,15, т. е. 10—15%.

При ацетилено-кислородной сварке факел пламени также достаточно защищает металл от проникновения к сварочной ванне

воздуха. Хотя в той зоне пламени, которая в основном плавит металл, как правило, содержится примерно 8—12%  $N_2$  [72], конечное содержание азота в швах при ацетилено-кислородной сварке сталей плавлением обычно не превышает 0,015—0,02% и мало сказывается на их механических свойствах.

Следует отметить, что дуговая сварка голым электродом в атмосфере воздуха, как правило, дает большее содержание азота в направленном металле, чем сварка в атмосфере чистого азота [65, 82]. Это может быть объяснено образованием в присутствии кислорода окислов азота [типа  $NO$ ], способствующих более легкому переходу азота в атомарное состояние при контактных соударениях с металлом в сравнении с соударениями с ним молекул  $N_2$  и в связи с этим более легкому поглощению его металлом. Также меньше, чем при сварке в воздухе, поглощение азота при сварке в диссоциированном аммиаке.

Очень интенсивно в условиях дуговой сварки происходит поглощение азота титаном. Так, по материалам Ф. Е. Третьякова [66], при сварке титана в азоте конечное его содержание в швах составляет около 6%, при этом металл швов имеет твердость, сопоставимую с алмазом, а пластичность почти нулевую.

Весьма важны при сварке и процессы взаимодействия металла с водородом, его поглощение металлом. Как уже указывалось в § II.1, источники водорода в условиях сварки достаточно разнообразны. Водород может поступать в реакционное пространство в чистом виде, а также в виде продукта диссоциации воды и различных водородсодержащих соединений. При этом высокие температуры при сварке, особенно дуговой, приводят к значительной диссоциации молекулярного водорода на атомарный, который легко растворяется и в жидком, а часто и в твердом металле. Так, например, твердый титан даже при относительно низких температурах (300—350° С) может поглощать водород достаточно интенсивно.

Растворимость водорода в железе в зависимости от температуры при его давлении в газовой фазе  $1 \text{ кг/см}^2$  приведена на рис. II.3. Максимальная растворимость водорода в жидком железе наблюдается при температуре  $\sim 2400^\circ \text{C}$ , т. е. близкой к температурам, до которых нагреваются капли металла при дуговой сварке плавящимся электродом. По работам Г. М. Григоренко и В. М. Лаконского [15], наблюдается приближение к насыщению водородом капель небольшого размера за время, сопоставимое со сварочным. Поэтому можно ожидать в каплях металла при дуговой сварке весьма высокую концентрацию водорода.

При снижении парциального давления водорода в газовой фазе предельное насыщение  $[H]$ , согласно формуле (II.14), должно быть ниже. По расчетам К. В. Любавского [38], эти значения растворимости показаны на рис. II.17. Однако следует отметить, что вследствие высоких температур сварочного процесса, способствующих диссоциации молекулярного водорода, возможно его

растворение в металле с количественными зависимостями, определяемыми формулой (II.15). Тогда возможны и большие степени насыщения металла водородом, что, в частности, было определено И. К. Походней [60] для быстро охлаждаемых специальным приспособлением капель металла.

Конечное содержание водорода в металле сварных швов в значительной степени зависит от способа сварки и применяемых сварочных материалов. Следует отметить, что исследования конечного содержания водорода в сварных швах и в наплавленном металле выполнялись по различным методикам, причем не всегда сообщались детали проведенных экспериментов, и поэтому имеющийся разброс значений, приводимых в литературе, не всегда можно объяснить. Однако некоторое представление о содержании водорода в швах дает табл. II.7.

Следует отметить, что при наиболее распространенной сварке полузакрытой дугой (штучными плавящимися электродами) конечное содержание водорода зависит и от абсолютной влажности воздуха (в  $г/м^3$ ), при которой выполняется сварка. Это особенно сказывается при сварке электродами, дающими низководородистый металл, например при фтористокальциевых покрытиях после высокотемпературной прокатки. В этом случае при переходе от сварки в сухом воздухе (паров воды 3—5  $г/м^3$ ) к сварке во влажном воздухе (паров воды 25—30  $г/м^3$ ) содержание водорода в металле швов возрастает на 1—1,5  $см^3/100 г$  (рис. II.18).

Такое повышение содержания водорода в подобных случаях определяется тем, что в реакционное пространство даже при сварке электродами с современными покрытиями частично проникает воздух (дуга полузакрытая). Из самых общих приближенных расчетных оценок по конечному содержанию азота в наплавленном металле можно заключить, что объем вовлекаемого в процесс воздуха в этих случаях примерно в 40—60 раз меньше, чем при сварке голым электродом без покрытий [55]. Но и это количество влажного воздуха может дать отмечаемое экспериментом увеличение содержания водорода в металле при сварке.

Водород в металле является весьма подвижным элементом, особенно при высоких температурах. Диффундируя в виде атома или протона, он может перераспределяться в металле, перемещаясь на значительные расстояния в различных зонах сварного соединения. В несплошностях разнообразного вида он может

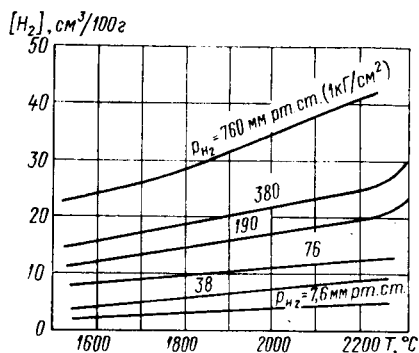


Рис. II.17. Влияние температуры и парциального давления водорода в газовой фазе на его растворимость в жидком железе

Обычные пределы содержания водорода в наплавленном металле и сварных швах

Способ сварки	Тип металла шва (наплавленного металла)	Пределы содержания водорода в $см^3/100 г$ металла	Примечание
Газовая (ацетилено-кислородная)	Малоуглеродистая сталь	3,0—5,0	При нормальной регулировке пламени
Дуговая сварка плавящимся штучным электродом: с покрытием, содержащим органические составляющие		15,0—35,0	—
С покрытием фтористокальциевого вида, нормальной прокатки		2,0—4,0	—
То же, повышенной влажности		5,0—7,0	—
То же, после высокотемпературной прокатки		~1,0	—
То же, стержень—аустенитная сталь	Cr—Ni аустенитная сталь	6,0—12,0	—
Автоматическая сварка под кремнемарганцовистыми флюсами	Малоуглеродистая сталь	3,0—5,0	—
Дуговая сварка в струе углекислого газа		<0,5	CO <sub>2</sub> с малым количеством влаги
Аргоно-дуговая сварка неплавящимся электродом	Низколегированная сталь	~0,5	В зависимости от содержания водорода в металле до сварки и влажности газа
	Титан	30,0—50,0	



переходить в молекулярную форму, оставаясь в них в виде остаточного водорода, практически потерявшего диффузионную подвижность при низких температурах.

Значительное влияние повышенного количества водорода на увеличение хрупкости сварных соединений как металла швов, так и околошовных зон (например, при сварке феррито-перлитных и закаливающихся при сварке сталей, а также титановых сплавов) заставляет в ряде случаев применять специальные меры по его ограничению. В этом отношении наиболее эффективны методы, приводящие к уменьшению количества водорода в газовой фазе,

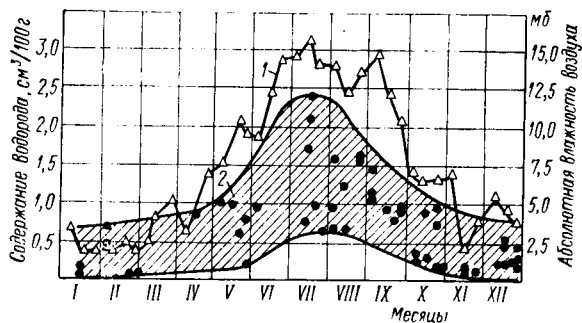
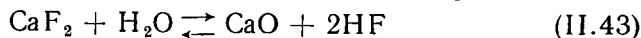
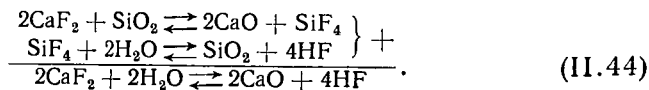


Рис. 11.18. Изменение абсолютной влажности воздуха по месяцам (1) и зона разброса содержания водорода в наплавленном металле при «карандашных» пробах (2)

контактирующей с металлом при сварке. Так, при сварке сталей удаляют ржавчину со свариваемых кромок и присадочной (электродной) проволоки, просушивают «отпотевшие» кромки, применяют низководородистые электроды (см. табл. II.7), в частности с покрытиями, содержащими фториды, создающие реакцию типа



со связыванием водорода в труднодиссоциирующие соединения, в данном случае HF [68]. Реакция значительно интенсифицируется присутствием  $\text{SiO}_2$ , в результате чего в качестве промежуточного соединения появляется  $\text{SiF}_4$



Этот принцип связывания водорода практически используется как при автоматической и полуавтоматической сварке под флюсами (содержащими и  $\text{CaF}_2$ , и  $\text{SiO}_2$ ), так и при сварке порошковыми проволоками с добавками в порошковое наполнение кремнефтористого натрия ( $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ ) или при сварке штучными электродами с добавками его в шихту электродных покрытий.

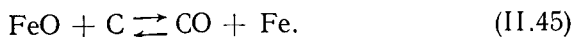
В ряде случаев титановые сплавы содержат достаточно большое количество водорода. Поэтому присадочные (электродные) материалы, применяемые при аргоно-дуговой сварке, для уменьшения концентрации водорода в сварных швах специально подвергают вакуумному отжигу при 800—850° С с выдержкой, зависящей от диаметра присадки (так называемой дегазации).

При сварке алюминия и его сплавов источником водорода является адсорбированный слой влаги на свариваемом основном металле и главным образом на присадочном металле в связи с его большой относительной поверхностью, участвующей в формировании металла шва. В этих случаях для аргоно-дуговой сварки алюминия и его сплавов необходима тщательная очистка кромок свариваемого металла и специальная обработка присадки — электрополировка [43], вакуумная термообработка, окислительный отжиг. Используемые при сварке защитные газы — инертные (в частности аргон) и активные (углекислый газ) — стремятся максимально обезводородить — обезvodить, высушить.

В некоторых случаях, например для сварки закаливающих сталей, применяют такие сварочные материалы, которые обеспечивают получение металла шва с аустенитной структурой, обладающей высокой растворимостью водорода при комнатных температурах и поэтому не отдающей водород в околошовные зоны. Кроме того, диффузионная подвижность водорода в решетке аустенита значительно меньше, чем в решетке феррита.

Водород (почти для всех металлов) и азот (в частности для железа) в случае значительного пересыщения ими жидкого металла по сравнению с предельной концентрацией их в закристаллизованном состоянии часто являются основной причиной пористости металла шва. В алюминиевых сплавах может появляться пористость и в околошовных зонах.

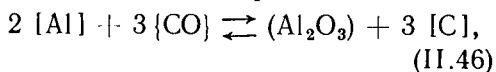
Пористость вызывается и другими газами. Так, например, в процессе сварки стали при окислении углерода перед кристаллизацией или во время ее протекания образующаяся окись углерода также создает поры



Такая реакция наиболее интенсивно проходит при высоких температурах (усиливается при температурах выше температуры плавления). Однако она принципиально не исключена и при температуре кристаллизации, особенно при малом количестве более активных при этой температуре раскислителей (Al, Ti, Si и др.).

Исключение или заметное ограничение реакции (II.45) возможно за счет уменьшения в металле исходного количества углерода, т. е. его уменьшения, например в сварочной присадочной проволоке, особенно при недостаточном количестве других раскислителей, обладающих при  $T \approx T_{\text{плFe}}$  большим сродством к кислороду, чем углерод, при имеющихся концентрациях.

В некоторых случаях возможны и другие реакции с составляющими защитных газов. Так, например, при наличии в электроде сильных раскислителей (Al, Ti и др.) и источников окиси углерода возможны реакции типа



при которых выделяющийся углерод растворяется в металле, что в ряде случаев недопустимо. Экспериментальные материалы А. П. Барышникова и Р. А. Козлова по применению электродов с большим количеством алюминия (в стержне или в виде порошка ферроалюминия в покрытии) приведены на рис. II.19.

В некоторых сварочных процессах через газовую фазу в металл поступают и другие элементы (фосфор — при ацетиленокислородной сварке, полезный для раскисления меди и вредный для сталей).

Как следует из этого общего, упрощающего фактически происходящие явления обзора, возможны различные варианты взаимодействия металла с газовой фазой в условиях сварки, весьма важные для конечного результата сварочной операции — получения доброкачественных сварных швов.

Меры радикальной борьбы с отмеченными выше вредными явлениями и регулирование процессов в направлении получения желаемых результатов определяются в основном правильным выбором сварочных материалов.

## § II.5. Взаимодействие металлической и шлаковой фаз при сварке

Шлаки в условиях сварки могут появляться самопроизвольно, например от реакций взаимодействия металла с газовой фазой, или вводятся искусственно для обработки жидкого металла или предохранения металла от воздействия газов.

В наиболее чистом виде взаимодействие шлаков с металлом наблюдается при электрошлаковой сварке. При других сварочных процессах обычно имеет место тройное взаимодействие — металл—шлак—газовая фаза.

Шлаками называются расплавы неметаллических соединений — окислов, галоидов, сульфидов и пр., как свободных, так и образующих комплексные соединения. Шлаки нерастворимы

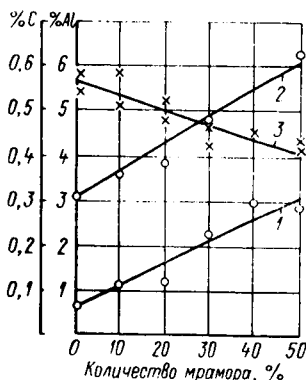


Рис. II.19. Изменение содержания углерода и алюминия в наплавленном металле в зависимости от количества мрамора в покрытии электродов:

1 — [C]<sub>эн</sub> = 0,08%; 2 — [Al]<sub>эн</sub> = 0,4%; 3 — алюминий в наплавленном металле

В металлах (за исключением отдельных их составляющих). В расплавленном состоянии металл и шлак представляют собой несмешивающиеся жидкости, разделяющиеся в связи с различием удельного веса (плотности), и имеющие границу раздела с той или иной поверхностной энергией (межфазным натяжением).

Свойства шлака, как физические (температура плавления, плотность — удельный вес, вязкость в зависимости от температуры и др.), так и химические (взаимодействие с металлом определенной композиции), зависят от его состава. Схематично строение шлака рассматривается как молекулярное или ионное (шлак состоит либо из молекул входящих в него соединений и их комплексов, либо представляет собой систему ионов, в которых катионы окружены анионами, а анионы — катионами). Современная ионная теория строения шлаков удовлетворительно согласуется с экспериментальными фактами и объясняет многие известные их свойства (электропроводность шлаков и ее увеличение с повышением температуры, влияние электрического поля на ряд процессов и др.). Молекулярная теория не отрицает наличия ионов в шлаках, но пренебрегает их воздействием на металл.

Несмотря на ряд недостатков молекулярной теории строения шлаков, в ряде случаев она с успехом используется для оценки взаимодействия шлак—металл. В связи с упрощенным рассмотрением процесса далее будем базироваться на представлениях молекулярной теории строения шлаков.

Химическое воздействие шлака на металл в значительной степени определяется соотношением в его составе кислых, основных и амфотерных окислов. Наиболее распространенными кислыми окислами в сварочных шлаках являются  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ , реже  $\text{P}_2\text{O}_5$ ; основными окислами являются  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{NiO}$  и др. Из амфотерных окислов наиболее распространены  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ .

Формальной характеристикой шлаков является их коэффициент кислотности  $k_k$  (или обратный ему коэффициент основности  $k_o$ ), рассчитываемый по формуле

$$k_k = \frac{\sum \text{RO}_2}{\sum (\text{R}_2\text{O} + \text{RO})}, \quad (11.47)$$

где  $\sum \text{RO}_2$  — сумма молярных процессов кислых окислов в шлаке;

$\sum (\text{R}_2\text{O} + \text{RO})$  — то же основных окислов.

Иногда используются и другие схемы расчета (по весовым процентам, по соотношению кремнезема и окиси кальция и пр.). Рассчитанные по любому из этих способов коэффициенты только весьма приближенно оценивают кислотность или основность шлака. Так, кислыми шлаками считаются шлаки, когда  $k_k > 1$  (соответственно  $k_o < 1$ ). Однако кислотный характер шлака будет проявляться только при содержании в нем свободных кислых окислов.

В шлаке, состоящем из 50%  $\text{SiO}_2$  и 50%  $\text{FeO}$ , коэффициент кислотности по формуле (II.47) будет равен единице, т. е. шлак как бы не кислый и не основной. А фактически он кислый, так как в нем образуется не только  $\text{SiO}_2 \cdot \text{FeO}$ , но и  $\text{SiO}_2 (\text{FeO})_2$ , что дает некоторое количество свободного  $\text{SiO}_2$ .

Если для простоты исключить влияние кислого окисла титана  $\text{TiO}_2$ , то более правильно подсчитывать коэффициент кислотности по формуле

$$k_{\kappa} = \frac{(\% \text{SiO}_2)}{a (\% \text{CaO}) + b (\% \text{MgO}) + c (\% \text{MnO}) + d (\% \text{FeO})}, \quad (\text{II.48})$$

где  $a, b, c, d$  — коэффициенты не более единицы, учитывающие различное сродство основных окислов к  $\text{SiO}_2$ .

Для шлаков, применяемых при автоматической сварке под флюсом, содержащим  $\text{SiO}_2$  от 2 до 48% мол.,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ , небольшие количества  $\text{MnO}$ ,  $\text{FeO}$ , а также от 2 до 48% мол.  $\text{CaF}_2$ , при обработке экспериментов с низколегированной сталью Ю. И. Шкатов получил следующие значения этих коэффициентов:  $a = 1$ ;  $b = 0,5$ ;  $c = 0,37$ ;  $d = 0,26$ .

Амфотерные окислы в различных условиях могут выступать, как основные (образуя комплексные соединения с кислыми, при недостатке основных окислов) или как кислые — при избытке основных.

Химическое воздействие шлаков на металл может быть окисляющим или раскисляющим, а также изменять в составе металла концентрацию других примесей (серы, фосфора и пр.).

В случае если шлак, содержащий закись железа в значительных количествах, будет контактировать с расплавленным железом, то согласно формуле (II.13), закись из шлака будет переходить в растворяющий ее металл. По данным А. А. Ерохина [23], для сварных швов этот процесс характеризуется следующими значениями:

Содержание $\text{FeO}$							
в шлаке в %	14,2	15,0	22,7	26,8	56,0	55,2	61,0
Содержание $\text{O}_2$ в							
металле шва в %	0,036	0,039	0,062	0,118	0,187	0,193	0,211

Аналогично свои окислы растворяют никель, медь и титан.

При взаимодействии с расплавленным железом шлаков, содержащих относительно непрочные окислы кремния и марганца, происходят обменные реакции (II.11) и (II.12), в результате которых освобождаются кремний и марганец и образуется  $\text{FeO}$ , перераспределяющаяся между металлом и шлаком. Количество  $\text{FeO}$  в шлаке возрастает.

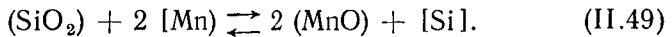
Наиболее заметен этот процесс при электрошлаковой сварке, когда сменность шлака невелика.

В табл. II.8 приведен характер изменения состава шлака при получении слитка длиной 250 мм переплавлением проволоки марки Св-10Г2 (см. приложение 1) под флюсом АН-8.

## Изменения в составе шлака при электрошлаковом переплаве

Анализируемый материал	Состав в % вес.						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	FeO	CaF <sub>2</sub>
Исходный шлак (флюс АН-8)	32,62	9,4	7,6	7,0	25,3	1,6	15,9
Шлак после окончания переплава	29,0	7,0	7,8	5,5	30,6	7,7	12,9

В конечном составе шлака наблюдается значительное увеличение FeO (примерно в 5 раз) и некоторое увеличение MnO, определяемое выгоранием Mn переплавляемой проволоки, например, по реакции



В связи с накоплением в шлаке FeO кремнемарганцевовосстановительные процессы по реакциям (II.11) и (II.12) должны затормаживаться, что видно по характеру зависимостей, приведен-

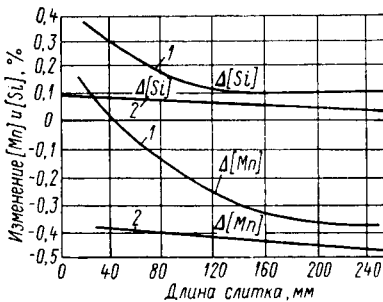


Рис. II.20. Переход марганца и кремния в металл на различных участках по длине слитка при электрошлаковом переплаве:

1 — проволока Св-15Г; 2 — проволока Св-10Г2

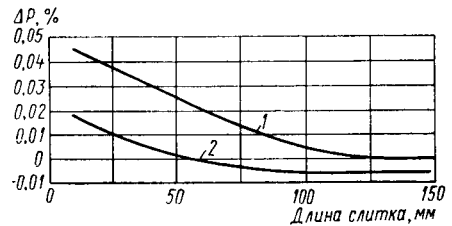


Рис. II.21. Изменение содержания фосфора по длине слитка при сварке под флюсами: АН-8 (1) и АН-22 (2)

ных на рис. II.20. В этом случае слиток, полученный методом электрошлакового переплава в медный кокиль, имел длину 250 мм. Переплавлялись проволоки Св-15Г (~0,2% Si; ~1,0% Mn) и Св-10Г2 (~0,25% Si; 1,6% Mn) под флюсом АН-8 (33—36% SiO<sub>2</sub>; 24—26% MnO).

Происходит также изменение содержания и других элементов. Например, рис. II.21 показывает изменение содержания фосфора по длине слитка при сварке под двумя различными флюсами — АН-8 и АН-22.

Бесьюма важными для получения надлежащих свойств металла являются и физические свойства шлаков. Хотя по количественным показателям некоторых физических свойств шлаков общие рекомендации не являются достаточно точными, кое-что может быть сформулировано на базе имеющихся исследований и сварочной практики. Так, для обеспечения достаточно полного взаимодействия металла и шлака последний должен находиться в расплавленном состоянии, покрывая всю поверхность сварочной ванны. Для этого температура плавления шлака  $T_{пл.ш}$  должна быть несколько ниже температуры плавления металла  $T_{пл.м}$  или же сопоставима с ней. Если  $T_{пл.ш} \ll T_{пл.м}$ , то шлак сильно перегревается, растекается по подогретым кромкам далеко за пределы ванны, остается на ванне только тонким слоем и может даже закипеть. Все это ограничивает его защитное действие.

При сварке стали, как показала практика, наиболее целесообразно применение шлаков с температурой плавления на  $200 - 350^\circ \text{C}$  ниже  $T_{пл.м}$ .

Однако для шлаков понятие температуры плавления в значительной степени условно. Они изменяют свою вязкость от большой (которая может относиться к понятию твердого состояния) до малой (как для жидкости) в том или ином интервале температур. При малом температурном интервале такого значительного изменения вязкости шлаки называются короткими, а при плавном изменении вязкости в широком интервале температур — длинными. Качественная характеристика изменения вязкости у коротких и длинных шлаков приведена на рис. II.22.

Короткими шлаками являются, как правило, шлаки значительной основности. Они быстро переходят из состояния жидкоподвижности к состоянию затвердевшей шлаковой корки.

Кислые шлаки обычно загустевают постепенно и получают аморфное, стеклообразное состояние.

В ряде случаев более технологичными в варочных условиях являются короткие шлаки, позволяющие лучше формировать, например, вертикальные швы при дуговой сварке.

Самое значение вязкости шлаков в области температур сварочной ванны и ее затвердевания также является важной характеристикой. При обычной для расплавленного металла вязкости  $\eta_m = 0,01 \div 0,02 \text{ пз}$  шлаки должны быть значительно более вязкими. Удовлетворительными характеристиками обладают шлаки (применяемые при сварке сталей) с  $\eta_{ш} = 0,8 \div 3,0 \text{ пз}$ . Шлаки с вязкостью при температуре  $\sim 1500^\circ \text{C}$   $\eta_{ш} = 10 \text{ пз}$  и более непригодны для сварочных целей.

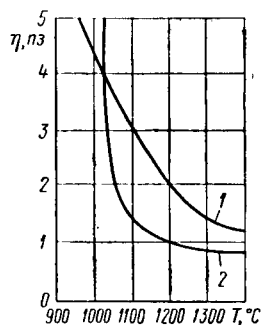


Рис. II.22. Типичные зависимости изменения вязкости  $\eta_{ш}$  длинного (1) и короткого (2) шлаков от температуры

В ряде случаев для разжижения весьма вязких шлаков к ним добавляют плавни — плавиковый шпат  $\text{CaFe}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  и др. Эти добавки могут одновременно выполнять и другие специфические функции [см., например, реакции (II.43), (II.44)].

Весьма важной характеристикой сварочных шлаков является межфазное натяжение на границе шлак—металл. Оно определяет формирование наружной поверхности сварных швов, выполняемых в различных пространственных положениях, влияет на разделение шлака и металла, перемешанных друг в друге, на возможность отрыва шлаковых частиц

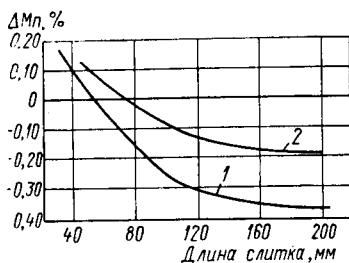


Рис. II.23. Влияние газовой защиты поверхности шлаковой ванны на содержание марганца в слитке после электрошлакового переплава (проволока Св-15Г, флюс АН-8):

1 — без защиты; 2 — защита аргоном

с нижней части ванны, например при сварке на флюсовой подушке, и имеет ряд других технологически важных особенностей, обеспечивающих необходимые качества сварных соединений.

Разделение шлака и металла в определенной степени зависит от плотности шлака или, точнее, от разности плотностей шлака и жидкого металла. Так, при увеличении этой разности (т. е. при меньшей плотности шлака) он легче удаляется из сварочной ванны, хотя этому процессу способствует при сварке и направленная, последовательная кристаллизация металла от периферии

(границы сплавления) к наружной поверхности ванны.

Малоизученной применительно к сварочным шлакам, но весьма важной их характеристикой является газопроницаемость. Как указывалось выше, одной из задач, которая должна решаться применением шлаков, является создаваемая ими защита металла от вредно воздействующих на него газов. Наиболее интенсивно через шлаки мигрирует водород; возможно проникание через шлаки кислорода и азота. Пример недостаточной защиты металла шлаком показан на рис. II.23. При дополнительной защите шлаковой ванны аргоном или азотом потери марганца при электрошлаковом переплаве меньше, чем при наличии над шлаковым покровом воздуха. Особенно сильно это проявляется при электрошлаковой сварке титана. В этих случаях шлаковый покров из расплавленных фторидов весьма газопроницаем. Например, по данным С. М. Гуревича [16], в металле титановых швов в случае отсутствия дополнительной аргонной защиты над ванной концентрация кислорода возрастает до 1,22%, а азота — до 0,37%. При дополнительной защите аргоном, отесняющим воздух от поверхности шлака, содержание этих примесей находится на уровне переплавляемых металлов ( $[\text{O}_2] \approx 0,15\%$ ;  $[\text{N}_2] \approx 0,05\%$ ). Аналогичные результаты получены и другими исследователями.



Водопроницаемость основных шлаков значительно больше, чем кислых [25], что является одним из существенных их недостатков.

Как уже отмечалось, в ряде сварочных процессов происходит совместное взаимодействие металлической, шлаковой и газовой фаз. Так, в случае применения электродов с покрытиями газошлакового типа в реакционном пространстве (зона плавления электрода в период переноса капель в ванну и область сварочной ванны) металл взаимодействует и со шлаками (в основном получающимися от расплавления шлакообразных составляющих покрытия и от перевода некоторого количества металла стержня

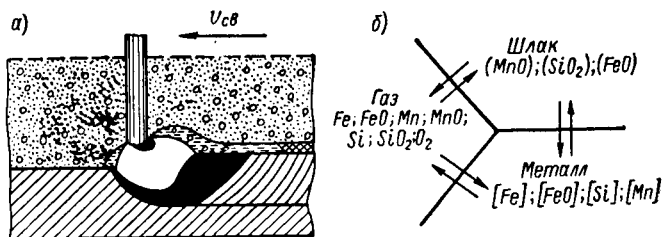


Рис. П.24. Общая схема взаимодействия металла с газами и шлаком при автоматической сварке под флюсом: а — продольный разрез через сварочную ванну; б — схема взаимодействия металл—шлак—газ

и металлических составляющих покрытия в неметаллические соединения — окислы, нитриды и пр.), и с газовой фазой (выделяющейся из покрытия, паров металла и продуктов возгонки металла и неметаллических соединений с добавлением воздуха из окружающего пространства). При автоматической и полуавтоматической дуговой сварке под флюсом расплавляющийся гранулированный флюс взаимодействует и с каплями и со сварочной ванной, причем дуга горит в газовом пузыре, контактирующем с металлом капель и ванной. Этот газовый пузырь характеризуется меньшим объемом газов, взаимодействующих с металлом, чем в предыдущем случае сварки открытой или полузакрытой дугой, и состав газов в пузыре в основном определяется газами и парами, выделяющимися при переплавлении дугой металла электродной проволоки, основного (свариваемого) металла и шлака. Газовая фаза состоит при этом из паров составляющих металла, ряда соединений, выделяющихся из металла и флюса (шлака), газов, содержащихся в металле и получаемых от диссоциации соединений. Схема взаимодействия фаз при процессе сварки под флюсом упрощенно представлена на рис. П.24.

Общее теоретическое исследование процесса взаимодействия металл—шлак только через газовую фазу было выполнено В. И. Дятловым [21] на основании предположения о достижении термодинамического равновесия при высоких температурах. Он

принял в качестве металла чистое железо, а шлак — состоящим из  $\text{SiO}_2$  и  $\text{MnO}$  в различных соотношениях. Его расчеты показали возможность наличия в газовом пузыре парциального давления кислорода  $\sim 0,1 \text{ ат}$ . Принимая схему легирования металла (при расчетной средней температуре ванны  $2450^\circ \text{C}$ ) через газовую фазу по равновесной концентрации паров кремния и марганца в газовой фазе, В. И. Дятлов получил расчетно величины концентраций этих элементов в металле, сопоставимые с наблюдаемыми в практике при сварке малоуглеродистой стали под кремнемарганцевыми флюсами.

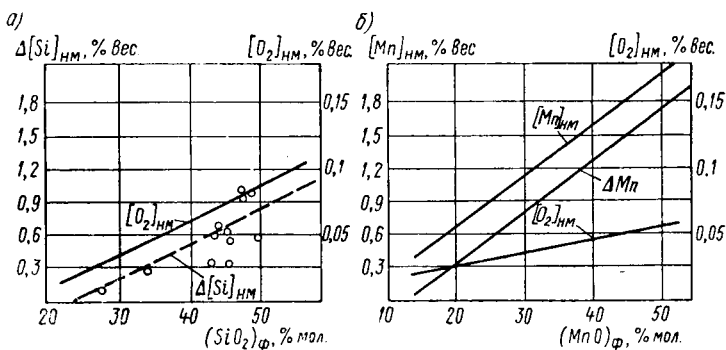


Рис. 11.25. Изменение содержания кислорода (кремния и марганца) в наплавленном металле при автоматической сварке малоуглеродистой стали под различными по составу флюсами: а — под флюсами с  $(\text{SiO}_2)_{\text{ф}} \approx 50\%$ ; б — под флюсами с  $(\text{MnO})_{\text{ф}} \approx 50\%$

Применение такой схемы, но не к ванне, а к каплям наплавленного металла, в сопоставлении с экспериментально найденными коэффициентами для различных составов флюсов позволило М. Д. Щипкову [78] вывести зависимости содержания в металле швов кремния, марганца и кислорода применительно к широкому диапазону кремнемарганцевых флюсов с обычными для них добавками других, относительно пассивных составляющих. Основные результаты этого исследования следуют из графиков на рис. 11.25.

Восстановленные из флюса и легирующие металл шва (через металл, наплаваемый в виде капель) кремний и марганец одновременно вводят в металл и кислород (через закись железа  $\text{FeO}$ ). Расчетные формулы, полученные М. Д. Щипковым, дают удовлетворительную сходимость с практикой для высококремнистых, высокомарганцевых флюсов при сварке на обычно применяемых режимах. В этих случаях:

$$[\text{Si}]_{\text{ми}} = \psi [\text{Si}]_{\text{ом}} + (1 - \psi) [\text{Si}]_{\text{эн}} + 3(1 - \psi) \{ (\text{SiO}_2)_{\text{ф}} - 0,24 \}; \quad (\text{II.50})$$

$$[\text{Mn}]_{\text{ми}} = \psi [\text{Mn}]_{\text{ом}} + (1 - \psi) [\text{Mn}]_{\text{эн}} + 4,4(1 - \psi) \times \{ (\text{MnO})_{\text{ф}} - 0,12 \}; \quad (\text{II.51})$$

$$[\text{O}]_{\text{ми}} = \psi [\text{O}]_{\text{ом}} + (1 - \psi) [0,43 \{ (\text{SiO}_2)_{\text{ф}} - 0,24 \} + 0,16 \{ (\text{MnO})_{\text{ф}} - 0,12 \} + [\text{O}]_{\text{эн}}], \quad (\text{II.52})$$

где  $[X]_{\text{мш}}$ ,  $[X]_{\text{ом}}$ ,  $[X]_{\text{эн}}$  — соответственно концентрации элемента X (Si, Mn, O) в металлах шва, основном и в электродной проволоке;  
 $\psi$ ,  $(1 - \psi)$  — доли основного и наплавленного металла в металле шва;  
 $(\text{SiO}_2)$ ,  $(\text{MnO})$  — концентрации этих окислов во флюсе в молярных долях.

Однако ни в схеме В. И. Дятлова, ни в расчетных формулах М. Д. Щипкова не учитывается влияние режимов сварки, которые при сварке под флюсом влияют и на относительное (к наплавленному металлу, к металлу шва) количество расплавляемого флюса (количество шлака) —  $\frac{G_{\phi}}{G_{\text{м}}}$ .

И. И. Фрумин исходя из представления об основном влиянии массопередачи при взаимном перемешивании металла и шлака, считает весьма важной величину межфазной поверхности. Изменением этой величины, связанной с размерами капель и количествами реагирующих веществ, и определяется влияние режима сварки. Важность влияния размера капель на степень их взаимодействия со шлаком подтверждается анализом состава капель различных размеров, извлеченных из шлаковой корки. Эти данные И. И. Фрумина [68] приведены в табл. II.9.

Таблица II.9

**Результаты спектрального анализа капель различного размера, извлеченных из шлаковой корки**

Диаметр капель в мм	Содержание Mn в каплях в %*	Содержание Cr в каплях в %**
1,4—1,6	1,21; 1,17; 1,23	2,85; 2,59; 2,68
0,8—1,1	1,31; 1,59; 1,38; 1,16	2,71; 2,65; 2,50
0,4—0,6	1,84; 1,90; 2,21; 2,22	1,66; 0,84; 0,74
0,1—0,2	1,77; 2,52; 3,5; 3,6	2,29; следы; следы

\* Сварка проволокой из стали 70 ( $[\text{Mn}]_{\text{эн}} = 0,34\%$ ) под флюсом АН-34 ( $[\text{MnO}]_{\phi} = 35\%$ ).  
 \*\* Сварка проволокой ЭИ-701 ( $[\text{Cr}]_{\text{эн}} = 2,9\%$ ) под флюсом АН-20.

Как следует из табл. II.9, при увеличении содержания марганца в металле вследствие реакций с флюсом АН-34, этот процесс протекает сильнее в каплях малого диаметра, где относительная поверхность больше (см. табл. II.3). Выгорание хрома в результате реакции с флюсом также интенсивнее в малых каплях.

Однако, видимо, не только в этом проявляется влияние сварочного режима. У. Франц [80] проводил киносъемку процесса сварки под флюсом с помощью специальной аппаратуры и уста-

новил, что в зависимости от режима дуги (главным образом  $I_{ca}$ ) изменяется характер переноса металла внутри газовой полости, в которой горит дуга. Это изменение характеризуется двумя схемами, приведенными на рис. II.26. При относительно малых значениях силы тока в электроде (до 380—400 *a* при диаметре электродной проволоки типа Св-08, равном 3 мм) наблюдается переход металла с электродной проволоки в ванну перетеканием по стенке шлакового купола, расположенного вокруг дуги (рис. II.26, *a*). Капли при этом достаточно крупные и длительность их существования большая.

При увеличении силы тока свыше некоторой критической величины, связанной с напряжением на дуге и маркой флюса, ха-

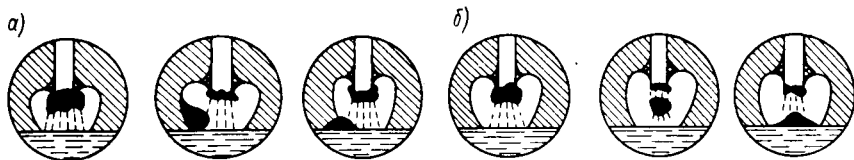


Рис. II.26. Схема перехода капель электродного металла в сварочную ванну: *a* — перетеканием (при малых  $I_{ca}$ ); *b* — без перетекания (при больших  $I_{ca}$ )

рактически характер перехода капель изменяется. Капли меньшего размера отрываются от конца электродной проволоки и перелетают в сварочную ванну, не касаясь стенок шлакового купола (рис. II.26, *b*). Такой качественно отличный характер перехода металла приводит и к иному конечному результату взаимодействия: контакт металла со шлаковой фазой (рис. II.26, *a*) оказывается более значимым, чем его контакт в основном с газовой фазой (рис. II.26, *b*).

Вероятно, это является основной причиной получения И. И. Фруминым [68] зависимости изменения выгорания углерода и хрома из электродной проволоки и уменьшения приращения марганца и кремния из флюса при сварке углеродистой проволокой из стали 70 и порошковой проволокой ПП-3Х2В8 от режима сварки (рис. II.27). И в этом случае (диаметр проволоки из стали 70 — 3 мм, порошковой — 3,5 мм, что примерно соответствует диаметру сплошной проволоки 3 мм) заметное изменение характера взаимодействия происходит при  $I_{ca} \approx 400$  *a*. Степень интенсивности взаимодействия (усиление выгорания углерода и хрома из проволоки, а также ослабление приращения марганца и кремния из флюса) зависит от напряжения на дуге, усиливаясь при его увеличении.

На рис. II.27, *a, в* точки и кривые нанесены так, как обработал результаты своих экспериментов И. И. Фрумин. Заштрихованные прямоугольники на рис. II.27, *б, г* показывают, что эти же данные можно обработать как имеющие качественный разрыв (в связи с изменением характера перехода капель с электрода) при  $I_{ca} \approx 400$  *a*.

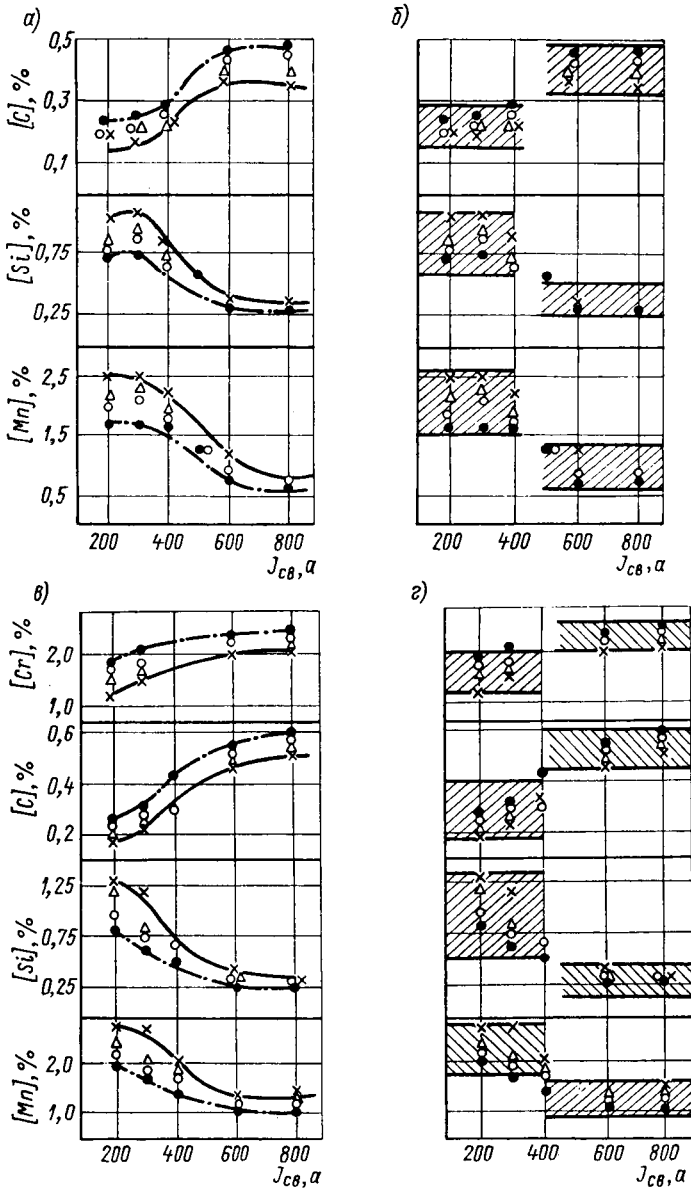


Рис. 11.27. Зависимость содержания Mn; S; C и Cr в наплавленном металле от силы сварочного тока  $I_{св}$  и напряжения на дуге  $U_d$ : а и б — проволока У70  $\varnothing$  3 мм, флюс АН-348; в и г — проволока ПП-3Х2В8  $\varnothing$  3,5 мм;

● —  $U_d = 25$  В; ○ — 30 В; Δ — 35 В; × — 42 В

Такое же ослабление взаимодействия при контакте капель металла только с газовой фазой подтверждается и опытами К. В. Багрянского и П. Ф. Лаврика [4], в которых жидкий шлак при сварке под флюсом специальными устройствами отделялся от металла. Результаты этих опытов отражены на рис. II.28, где показан характер изменения содержания марганца в капле за счет марганцевосстановительных процессов из флюса при двух схемах взаимодействия.

Количественные характеристики по кремне- и марганцевосстановительным процессам кроме рассмотренных факторов зависят

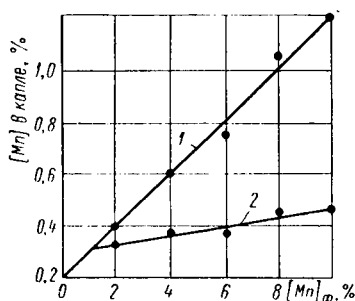


Рис. II.28. Изменение содержания марганца в капле металла и во флюсе при легировании через газовую и жидкую фазы (1) и через газовую фазу (2).

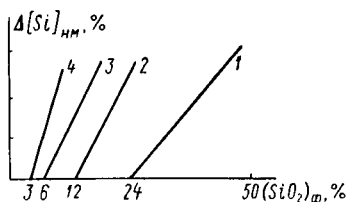


Рис. II.29. Зависимости прироста содержания кремния в наплавленном металле  $\Delta [Si]_{нм}$  от содержания  $(SiO_2)_ф$  во флюсе;

1 — электродная проволока марки Св-08А; 2 — легированная электродная проволока ( $\sum Mn, Cr, V = 4 \div 5\%$ ); 3, 4 — высоколегированная электродная проволока типов X18H9 и 1X18H9T

от основности флюса и наличия в его составе высших окислов.

Естественно, что при наличии в металле большей концентрации элементов с высокой степенью сродства к кислороду характер марганцевосстановительных и кремневосстановительных процессов при одном и том же составе флюса должен усиливаться. Так, если сварка производится малоуглеродистой проволокой марки Св-08, практически не содержащей сильных раскислителей (марганец в количестве 0,4% не может рассматриваться как сильный раскислитель), кремневосстановительный процесс начинает наблюдаться примерно только при 24% мол.  $SiO$  во флюсе, как это следует из рис. II.25, а; если применяется проволока с более сильными раскислителями, такой процесс будет происходить и с менее кремнесодержащими шлаками. Это показано посредством качественного сопоставления результатов ряда исследователей на рис. II.29. Действительно, при сумме  $Mn + Cr + V = 4 \div 5\%$ , по данным Ю. И. Шкатова, восстановление кремния из шлака начинается при его концентрации во флюсе около 12%. Такое восстановление имеет место при сварке проволокой типа 0X18H9 и 1X18H9T под флюсами, содержащими 6% и 3%  $SiO_2$  соответственно.

Поэтому для количественных оценок необходимо учитывать не только состав флюса, но и состав реагирующего со шлаком металла.

Весьма важным является вопрос о количестве шлака, взаимодействующего с металлом. В сталеплавильных процессах это количество обычно невелико — ~8%. В сварочных процессах оно, как правило, значительно больше. Так, при сварке электродами с покрытиями количество шлака составляет для различных марок 20—30% от наплавленного металла; при дуговой сварке под флюсом это количество колеблется в зависимости от режима сварки от 80 до 150% от веса переплавляемой электродной проволоки.

Естественно, возникает вопрос, какое же количество шлака участвует во взаимодействии с металлом.

При сварке электродами с покрытиями обычной толщины ( $\frac{G_{эп}}{G_{эс}} = 0,3 \div 0,4$ ) можно считать, что все покрытие взаимодействует с металлом. Поэтому

изменения режима сварки относительно слабо влияют на конечный результат — изменение состава наплавленного металла. Этот химический состав наплавленного металла является характерным для определенной марки электрода. По данным А. А. Ерохина, при большой толщине покрытия оно не целиком взаимодействует с металлом стержня.

При дуговой сварке под флюсом плавящимся электродом эта зависимость сложнее. Так, с увеличением напряжения дуги относительное количество переплавляемого флюса растет, а с увеличением силы тока, как правило, уменьшается. Однако во всем диапазоне обычно применяемых режимов количество расплавляемого гранулированного флюса значительно. Естественно, что не все объемы расплавленного флюса могут в одинаковой степени реагировать с металлом. Согласно схеме на рис. II.30, части шлака, затекающие в головную часть металлической ванны, натекающие по электродной проволоке на каплю и более или менее длительно взаимодействующие с жидким металлом, могут прореагировать полнее, скажем, до условной степени завершенности реакции, принятой за единицу. Другая часть шлака, например ограниченная в своих перемещениях гранулами подплавленного флюса или расплавляющаяся уже позади остывшей ванны, совсем не контактирует с металлом, и поэтому для него степень завершенности реакций взаимодействия равна нулю. Некоторые количества шлака имеют и промежуточную (между единицей

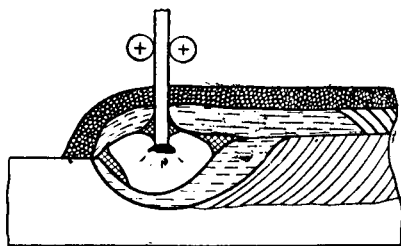


Рис. II.30. Схема процесса сварки под флюсом с выделением (штриховка крестом) его активной части, наиболее полно реагирующей с металлом

и нулем, в относительных величинах) степень взаимодействия с металлом. Это схематически показано на рис. II.31, где по оси ординат отложена относительная степень взаимодействия (от нуля до единицы), а по оси абсцисс количество реагирующего шлака в относительных величинах  $\frac{G_{\phi}}{G_m}$ . Характерная зависимость выражена кривой 1. Приводя площадь под кривой к прямоугольнику с ординатой, равной единице, можно получить некоторую величину  $\left(\frac{G_{\phi}}{G_m}\right)'$ , которая как бы прореагировала с металлом полностью, причем вся остальная часть флюса при этом оставалась полностью пассивной (степень взаимодействия равна нулю).

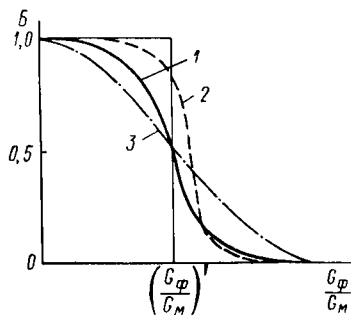


Рис. II.31. Схема зависимости полноты  $B$  реакций взаимодействия металл—флюс от общей относительной массы расплавляющегося при сварке флюса:

1 — общий характер зависимости; 2 — зависимость при большой реакционной способности металла и флюса; 3 — зависимость при малой реакционной способности металла и флюса

При каких-то других характеристиках активности металла (например, при значительном количестве элементов, активно взаимодействующих со шлаком) или флюса (например, его меньшей вязкости, большей жидкоподвижности) характер кривой типа 1 изменяется либо в сторону усиления взаимодействия (рис. II.31, кривая 2), либо в сторону его ослабления (кривая 3). Естественно, что при этом количественно изменится и значение  $\left(\frac{G_{\phi}}{G_m}\right)'$ .

Следует отметить, что по ряду экспериментов И. Т. Минакова и А. П. Барышникова рассчитанная таким образом величина  $\left(\frac{G_{\phi}}{G_m}\right)'$  для малоокислительных флюсов системы

$\text{CaO—CaF}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$  с добавками  $\text{SiO}_2$ , но при использовании проволоки диаметром 5 мм с активными раскалителями (~1—5% Ti и Al) и обычных силах тока  $I_{\text{св}} = 400\text{—}600$  а дала активно участвующую в реакциях часть флюса в пределах 0,15—0,22 (15—22%) от общего относительного расхода флюса при сварке. Аналогичного порядка получается величина активной части флюса (~25%) при пересчете данных К. В. Любавского и Е. П. Львовой по легирующему действию флюсов типа ФЦК [38]. По данным К. В. Багрянского и В. Я. Урюмова, при керамических флюсах  $\left(\frac{G_{\phi}}{G_m}\right)'$  около 40—50%.

Рассмотренные вопросы позволяют упрощенно схематизировать процессы взаимодействия металла и шлака при основных способах сварки, использующих различные сварочные шлаки, для правильного подхода к выбору тех или иных шлаковых систем для конкретных случаев сварки.



## § II.6. Поведение металлических составляющих сварочных материалов при сварке.

### Раскисление. Легирование

Известно, что свойства металлов вообще и сварных швов в частности определяются их химическим составом и структурой. При сварке различных металлов и сплавов требуемые составы металла сварных швов весьма разнообразны и варьируются в связи с эксплуатационным назначением сварной конструкции. Основным способом регулирования химического состава швов является варьирование состава наплавляемого металла (см. § I.1), т. е. применяемых сварочных материалов. Хотя составы электродных, присадочных материалов, регламентированные ГОСТами и ТУ, весьма разнообразны, обеспечить только ими необходимую номенклатуру составов металла швов (наплавки) оказывается затруднительным. Поэтому, например, для раскисления, а также легирования с целью получения необходимого состава металла швов (наплавки) при сварке кроме присадочного металла в процесс вводят через сварочные материалы необходимые элементы, обычно в виде добавок чистого металла или сплавов.

Способы введения дополнительных металлических материалов при сварке весьма разнообразны. Это могут быть различные металлические полуфабрикаты — присадочные вставки, вводимые в разделку; легированные проволоки в пластино-проволочных электродах при электрошлаковой сварке и др. Часто в качестве металлических добавок используются предварительно подготовленные порошки — изготовленные из монолитных кусков дроблением; восстановленные из сыпучих, порошкообразных соединений, в частности окислов, и пр. Такие порошки вводятся с другими материалами в шихту электродных покрытий в виде порошковой смеси во внутренние части порошковых проволок и лент, в порошкообразную шихту керамических флюсов, подвергаемую связыванию каким-либо клеящим материалом и гранулированную на определенных размеры. Реже порошковидные металлические материалы насыпают на свариваемое или подлежащее наплавке изделие и расплавляют на нем, причем иногда для закрепления их связывают в мастикоподобные пасты, наносимые на поверхность изделия.

В некоторых случаях основной целью применения порошкообразных металлических добавок является не изменение химического состава металла шва, а повышение производительности сварки (добавка железного порошка в электродные покрытия при сварке сталей и пр.).

В большинстве случаев дополнительные металлические материалы за период существования жидкого металла должны равномерно распределиться в металлической основе. Иногда этот процесс начинается в каплях присадки (электрода) и продолжается в сварочной ванне; в некоторых случаях он и начинается и заканчивается в сварочной ванне. В случае, когда такие добавки играют

роль элементов, связывающих кислород, их равномерное распределение в ванне и обеспечение этим процесса раскисления не является обязательным. Они могут оказывать и превентивное действие, связывая кислород еще до его поступления в металл каплей или ванны. Это явление в ряде случаев имеет место в электродных покрытиях, когда такие добавки, в частности элементы с большим сродством к кислороду, еще в составе покрытия связывают выделяющийся другими материалами кислород, который потенциально мог бы окислить расплавляемый металл стержня.

Кинетика растворения металлических добавок и выравнивания составов в жидких металлах изучена недостаточно. Однако в связи

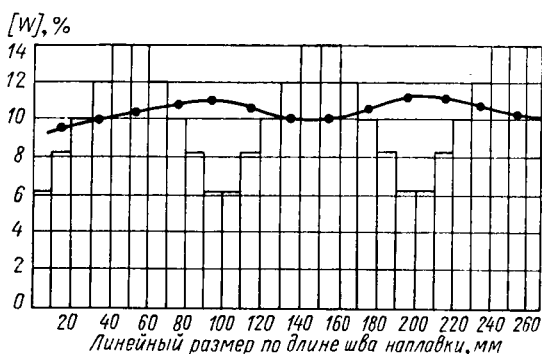


Рис. 11.32. Сопоставление начальной неоднородности распределения вольфрама по длине шва (столбики) и его концентрация в шве при автоматической сварке (точки). Длина ванны в процессе сварки ~50 мм

с обычно полной растворимостью металлов в жидком состоянии (за исключением некоторых пар металлов, нерастворимых друг в друге и практически не представляющих интереса в вопросах сварки, например железо—свинец) и значительным перемешиванием жидкости в сварочных условиях их наличие не препятствует быстрому завершению выравнивания состава жидкости.

На рис. 11.32 показано, как искусственно созданная неоднородность по длине шва закладыванием в разделку спрессованного в виде брикетов порошка с различным количеством вольфрама выравнивалась в ванне, если длина ванны превышала длину одного брикета [39]. Однако при заметно отличающихся температурах плавления смешиваемых металлов в швах иногда наблюдаются скопления нерастворившихся частиц тугоплавкого металла, особенно вблизи границы сплавления, где ванна имеет более низкую температуру и уменьшена длительность существования жидкости (например, железа при наплавке на сталь медных сплавов). В каплях электродного металла, как правило, растворение успевает проходить полностью, даже если растворяющийся в металличе-

ской основе дополнительный металл перед расплавлением был монолитным (например, при обвертке никелевой лентой железного сердечника при отношении  $\frac{Ni}{Fe} = \frac{1}{4}$  в каплях вблизи торца перед их отрывом от электрода состав металла не выявляет скопления никеля или железа).

Таким образом, как правило, взаимное растворение расплавленных металлических фаз при сварке успевает происходить достаточно полно.

Однако к металлическим порошкам, вводимым в электродные покрытия или в керамические флюсы, следует предъявлять требования, связанные с их геометрическими размерами. Так, если вводимый металлический порошок должен выполнять функции связывания кислорода, выделяющегося в покрытии еще до развития контакта расплавленного шлака (покрытия) с металлом капель на электроде, следует увеличивать поверхность взаимодействия такой добавки с окислителями. Это достигается применением более дисперсного порошка раскислителя. Если же металлический порошок покрытия должен выполнять функции легирования наплавленного металла, то для уменьшения потери окислением целесообразно применять более крупногранулированный порошок.

При этом ограничения по размерам частиц таких металлических порошков лимитируются не только изложенными соображениями. Так, чрезмерное увеличение размеров порошка (даже когда это целесообразно с точки зрения уменьшения потерь легирующего элемента) может осложнить производство электродов, ухудшить их технологические характеристики, а чрезмерное уменьшение частиц раскислителей может полностью ликвидировать их основное назначение, так как такой дисперсный порошок способен окислиться еще в период изготовления электродов (за счет реакций с жидким стеклом и пр.). Схематически это представлено на рис. II.33. В результате окисления окружающими частицу раскислителя материалами, выделяющими кислород (водный раствор жидкого стекла, применяемый для замеса шихты; соединения с меньшим сродством к кислороду, чем раскислитель, при температурах и условиях, имеющих место при изготовлении покрытых электродов — перемешивание, выдержки, прокатка и пр.), мелкие частицы раскислителя могут окислиться на весь объем (рис. II.33, а), в то время как более крупные частицы окисляются

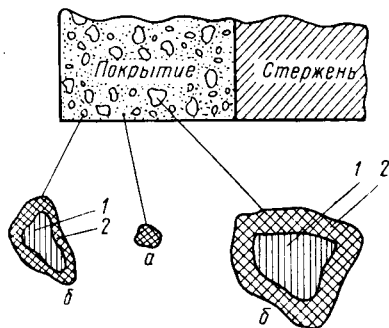


Рис. II.33. Различная степень окисленности частиц различного размера в покрытии в результате взаимодействия с окислителями:

1 — не окисленная область частицы покрытия; 2 — окисленный слой частицы

не полностью (рис. II.33, б, в). По данным А. А. Алова [3] о газо-выделении при воздействии соляной кислоты, можно считать, что после дробления и размола окисляется примерно 11%, а после пассивирования ~42% ферромарганца. По данным [62], количество окисленного марганца в покрытиях целлюлозного типа еще до сварки составляет 35—50%. Даже значительно менее активный молибден в покрытиях окисляется примерно до 33%.

Аналогичные процессы должны иметь место и при изготовлении керамических флюсов, хотя для этих материалов сведений об окислении легирующих и раскисляющих металлических добавок в литературе нет.

В связи с рассматриваемым вопросом о растворении металлических порошкообразных составляющих в основном металле сплава интересно отметить некоторые особенности сварки под керамическими флюсами. В отдельных опытах И. Т. Минакова было отмечено [при опытах с определением активной части флюса ( $\frac{G_{\phi}}{G_m}$ )]

согласно рис. II.31], что усваиваемая часть никеля и вольфрама, введенных в виде порошков на растворе жидкого стекла в весьма малоокислительный флюс типа 480Ф-6, оказывается различной. Никель, который, как и вольфрам, в этих условиях окисляться практически не должен, подал в металл (легирует шов) в количестве, соответствующем 25—30% расплавленного флюса (что совпадает с перерасчетом данных К. В. Любавского и Е. Л. Львовой [38]), а вольфрам — в количествах, соответствующих ~50% расплавленного флюса. Это может быть объяснено ускоренным опусканием вольфрама (плотность его ~19 г/см<sup>3</sup>), более тяжелого, чем никель (~8 г/см<sup>3</sup>), в слое флюса, находящегося над ванной. Отсюда следует, что в некоторых случаях попадание металла порошковых составляющих в ванну может быть лимитировано процессом их перемещения в шлаке, а это зависит не только от свойств этих металлических частиц, но и от вязкости шлака.

Рассмотрим некоторые количественные характеристики процессов испарения, раскисления и легирования металлическими добавками для наиболее распространенного случая — сварки электродами с покрытиями. Эти характеристики с некоторыми поправками (в частности, на активно взаимодействующую с металлом часть расплавляющегося флюса) можно применить и к керамическим флюсам.

Раздельное определение потерь испарением элемента, вводимого в покрытия и имеющегося в стержне, нам не известно. Общие закономерности, рассмотренные в § II.1, остаются верными, хотя на количественные относительные характеристики могут влиять такие факторы, как меньшая масса частиц и их большая относительная поверхность, что ускоряет его испарение, и меньшая в среднем температура расплавляемого покрытия, чем металлической капли, уменьшающая интенсивность испарения, так как некоторое время металлическая частица находится в расплавляю-

щемся покрытию и только затем попадает в металл и нагревается до большей температуры. В связи с этим приближенно можно считать, что потери в результате испарения элемента из стержня и покрытия должны быть количественно сопоставимыми.

Иначе обстоит дело с раскислением.

При сварке электродами с покрытиями основным источником окисления металла является не кислород воздуха, а кислород самого покрытия. При этом его большие количества выделяются в непосредственной близости к расплавляемому металлу и в сравнении с голым электродом не должны транспортироваться из отдаленных зон воздушного столба, окружающего дугу.

Рассчитаем для некоторых типовых покрытий возможное выделение кислорода, относя его либо к 1 г, либо к 100 г расплавляемого металлического стержня.

Электроды типа УОНИ-13/45, УОНИ-13/55 имеют относительный вес покрытия 30—35%, т. е. на 100 г электродного стержня общий вес покрытия составляет 30—35 г. При количестве мрамора в шихте (в мраморе ~92%  $\text{CaCO}_3$ ) от 51 до 54%, т. е. ~52%, с учетом и сухого остатка жидкого стекла в покрытии 10—14% (в среднем 12%) получим относительное количество  $\text{CaCO}_3$  в покрытии

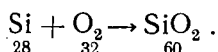
$$A = \frac{0,52}{1,12} 0,92 \cdot 100 = 43\%$$

или на 100 г металла стержня  $0,43 \cdot 0,33 \cdot 100 \approx 14$  г. При диссоциации мрамора по реакции (II.33) может выделиться 16%  $\text{O}_2$  от веса  $\text{CaCO}_3$ , т. е.  $14 \cdot 0,16 \approx 2,2$  г. Если все это количество кислорода провзаимодействует с металлом стержня, то предельная концентрация кислорода в наплавленном металле равна ~2,2% (2,2 г  $\text{O}_2$  на 100 г Fe).

Другие составляющие покрытия типа УОНИ-13 (плавиковый шпат —  $\text{CaF}_2$ , кварцевый песок —  $\text{SiO}_2$ , сухой остаток жидкого стекла —  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ , бентонит —  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) по существу для окисления кремния и марганца заметным источником кислорода быть не могут. Хотя при введении в электрод (покрытие) весьма активных раскислителей типа титана, алюминия и  $\text{SiO}_2$  может стать источником кислорода для их окисления.

Какое же количество раскислителей должно быть введено (в стержень или в покрытие в величинах, отнесенных к весу стержня) для связывания таких количеств кислорода?

Рассчитаем раскисление кремнием



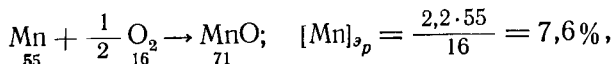
Для связывания 2,2 г  $\text{O}_2$  (2,2% к весу стержня) нужно

$$\text{Si} = \frac{2,2 \cdot 28}{32} \approx 1,9 \text{ г или } 1,9\% \text{ к весу стержня.}$$

На рис. II.34 приведены материалы Т. Н. Дубовой по влиянию количества кремния  $[Si]_p$ , вводимого в покрытие такого вида, отнесенного по весу к весу электродного стержня [19]. Раскисление в этом случае осуществлялось только кремнием. Стержень был изготовлен из проволоки Св-08, содержащей 0,38% Mn и 0,01% Si.

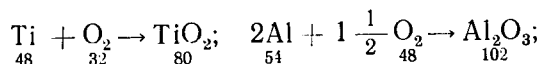
Как следует из рис. II.34, при увеличении количества кремния до значений  $[Si]_p \approx 1,8\%$  роста содержания кремния в наплавленном металле не наблюдается (он остается на уровне 0,02—0,05%, которыми пока пренебрегаем), т. е. он весь уходит на раскисление. Эта величина 1,8%, идущая на раскисление, очень близка к полученной выше расчетом величине 1,9%, необходимой для связывания кислорода, выделяющегося мрамором (при конечных продуктах CaO, CO и SiO<sub>2</sub>).

Рассчитаем, какими же количествами других раскислителей может быть заменено это количество кремния для раскисления ( $[Si]_p = 1,9\%$ ), т. е. для связывания 2,2% O<sub>2</sub>. При раскислении марганцем оно должно быть равно:



т. е. примерно в 4 раза больше, чем кремния.

Соответственно для раскисления титаном и алюминием:



$$[Ti]_p = \frac{2,2 \cdot 48}{32} = 3,3\%; \quad [Al]_p = \frac{2,2 \cdot 52}{48} = 2,4\%,$$

т. е. и титана, и алюминия для связывания того же количества кислорода надо заметно больше, чем кремния, хотя их средство к кислороду значительно выше.

При пересчете этих количеств к покрытиям, в которые все эти раскислители могут вводиться в виде порошков (ферросилиций с 75% Si; ферромарганец с 80% Mn; ферротитан с 25% Ti и алюминий в порошке, ~90% Al), получаем соответствующие количества их в шихте покрытия:

$$FeSi = \frac{1,9 \cdot 1,12}{0,33 \cdot 0,75} = 8,6\%;$$

$$FeMn = \frac{7,6 \cdot 1,12}{0,33 \cdot 0,80} = 32,0\%;$$

$FeTi = \frac{3,3 \cdot 1,12}{0,33 \cdot 0,25} \approx 45\%$  (без учета примерно до 7% Al, содержащегося с учетом Al  $FeTi \approx 35\%$ );

$$Al = \frac{2,4 \cdot 1,12}{0,33 \cdot 0,90} = 9,0\%.$$

При этих расчетах коэффициент 1,12 определяется переводом процентного содержания материала в электродном покрытии к процентному содержанию его в шихте посредством учета сухого остатка жидкого стекла.

Часто в покрытиях применяются комбинации раскислителей, например ферросилиция с ферромарганцем или еще дополнительно с ферротитаном (как в основном составе покрытия УОНИ-13).

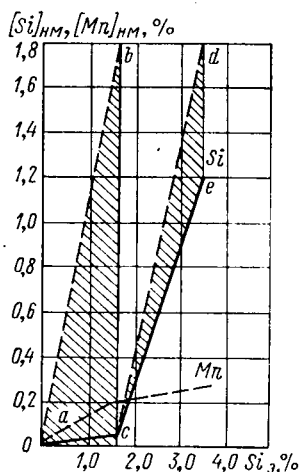


Рис. II.34. Зависимость содержания кремния и марганца в наплавленном металле от содержания кремния в электроде (при  $[Mn]_0 = 0,38\%$ )

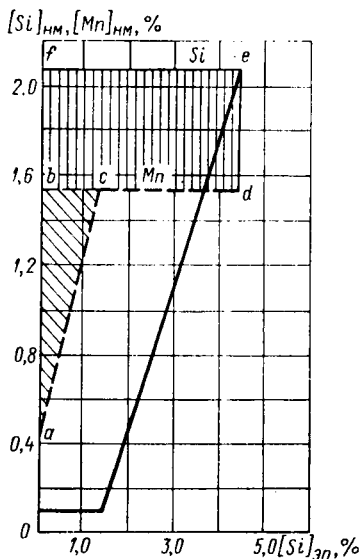


Рис. II.35. Зависимость содержания кремния и марганца в наплавленном металле от содержания кремния в электроде (при  $[Mn]_0 = 2,0\%$ )

Схематизированная обработка опытов Т. Н. Дубовой при постоянном и повышенном количестве  $[Mn]_0 = 2\%$  (т. е. примерно  $\frac{2,0 - 0,38}{0,33} \frac{1,12}{0,8} \approx 7\%$  FeMn в шихте электродного покрытия и 0,38% Mn в стержне) приведена на рис. II.35. Как следует из этих данных, при  $[Si]_0$  меньше  $\sim 1,6 - 1,7\%$  марганец выступает как раскислитель (косо заштрихованный треугольник *abc*), причем его роль как раскислителя постепенно ослабляется по мере увеличения  $[Si]_0$ , от 0 до 1,6% (прямоугольник *bfed*, заштрихованный вертикальными линиями между  $[Mn] = 2\%$  и  $[Mn] = 1,55\%$ , условно принят как изображающий потери марганца испарением и окислением при изготовлении электродов). Начиная с  $[Si]_0 \approx 1,6 \div 1,7\%$ , количество  $[Mn]_{HM}$  стабилизируется на величине  $\sim 1,50\%$  и остается постоянным при количествах кремния, достаточных для полного раскисления. Таким образом, введение

марганца в количествах  $\sim 2\%$  позволяет заменить по связыванию кислорода примерно  $0,2\%$  Si (т. е.  $[\text{Si}]_p = 1,8 \div 1,9$  без марганца и  $1,6\text{—}1,7\%$  при  $2\%$  Mn) и связать до  $1\%$  общего кислорода, выделяемого покрытием.

При реальном количестве раскислителей в покрытии УОНИ-13/55 в количествах  $12\%$  FeTi;  $5\%$  FeSi и  $5\%$  FeMn подсчитаем в соответствии с ранее принятой схемой относительные количества связываемого этими раскислителями кислорода. Для полного его связывания в шихте должно быть  $8,6\%$  FeSi, а имеется  $5,0\%$ . Это количество свяжет  $\frac{5,0}{8,6} 100 \approx 58\%$  общего кислорода. Соответственно ферротитан способен связать  $\frac{15}{35} 100 \approx 43\%$  кислорода. Ферромарганец — примерно  $5\text{—}10\%$  кислорода.

Таким образом, потенциальные возможности введенного в покрытие количества раскислителей больше, чем необходимых для связывания выделяемого покрытия кислорода (может быть связано  $58,0 + 43 + 5 = 106\%$ ), т. е. часть раскисляющих элементов будет оставаться в виде легирующих добавок. Обычно это марганец и кремний, так как титан и алюминий выгорают практически полностью.

Этот приближенный расчет, легко сопоставляемый и подтверждаемый экспериментальными исследованиями по конечному содержанию марганца, кремния, титана и алюминия в наплавленном металле, указывает на правильный количественный подбор раскислителей в электродах УОНИ-13/55, а также и на вероятную применимость рассмотренной выше расчетной схемы.

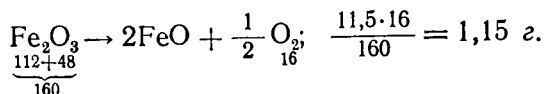
Менее точными получаются расчеты при использовании руднокислых покрытий в связи с недостаточно точными данными о степени завершенности реакций раскисления составляющих покрытия.

Произведем, например, расчет для электрода ЦМ-7  $\left( \frac{G_{\text{эн}}}{G_{\text{эс}}} \approx \approx 0,4 \right)$ .

Покрытие с учетом сухого остатка жидкого стекла содержит: гематит —  $29,4\%$ ; гранит —  $28,6\%$ ; ферромарганец ( $c \sim 1\%$  Mn)  $26,8\%$ ; крахмал —  $4,5\%$  на  $100$  г стержня.

Получается вышших окислов железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ):  $0,4 (29,4 \cdot 0,92 + 28,6 \cdot 0,05) = 11,5$  г, где  $0,92$  и  $0,05$  — обычные количества  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в гематите и граните в  $\%$ .

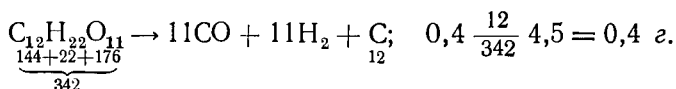
Выделяется кислорода при диссоциации до более устойчивого окисла FeO



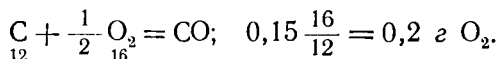
Для связывания этого кислорода идут углерод и марганец. Количество активного углерода в покрытии получается как  $1\%$  от



количества ферромарганца:  $0,4 \cdot 0,01 \cdot 26,8 \approx 0,11$  г, и как избыточное из крахмала по реакции



Тогда всего  $0,11 + 0,04 = 0,15$  г. Это количество углерода может связать по реакции



Остальное количество кислорода ( $1,15 - 0,2 \approx 0,95$  г) должно связываться марганцем из ферромарганца. Для этого надо  $1 \cdot \frac{55}{16} = 3,4$  г Mn. Вводимое количество марганца в покрытии ЦМ-7 значительно больше:  $0,4 \cdot 26,8 \cdot 0,8 = 8,5$  г. Таким образом, если даже считать, что в покрытиях не окисленного при дроблении марганца остается  $\sim 70\%$  от его исходного количества, т. е.  $8,5 \times 0,7 = 6$  г, примерно  $6,0 - 3,4 = 2,6$  г Mn остается избыточным и может пойти на испарение, на легирование наплавленного металла и на частичное восстановление закиси железа по реакции  $(FeO) + [Mn] \rightarrow (MnO) + [Fe]$ . Из экспериментов известно, что при сварке электродами ЦМ-7 происходит некоторое легирование наплавленного металла марганцем до  $\sim 0,9 - 1,0\%$  (при содержании в электродном стержне  $\sim 0,4\%$  Mn), т. е. на это расходуется около  $0,5 - 0,7$  г. Остальное же идет на испарение и восстановление FeO из шлака.

Легирование связано также с химической активностью элемента и упругостью его паров в условиях сварки. Так, например, из рис. II.34 следует, что хотя кремний является в покрытиях типа УОНИ-13 элементом, связывающим кислород, при его достаточно больших количествах в электроде (больше  $1,8\%$ ) он может выступать как легирующий элемент. При этом, если в металл переходит  $100\%$  Si, то рост  $[Si]_{nm}$  отвечал бы прямой *cd*; фактически он ниже (прямая *ce*), т. е. имеются потери. Для количеств кремния в электроде больших, чем необходимо для связывания выделяемого покрытием кислорода, содержание кремния в наплавленном металле может быть определено уравнением

$$[Si]_{nm} = k \{ [Si]_s - [Si]_{sp} \}, \quad (II.54)$$

где  $[Si]_{sp}$  — часть, идущая на раскисление — связывание кислорода из  $CaCO_3$  (в рассчитанном примере  $\sim 1,8\%$ );  
 $k$  — угловой коэффициент прямой *ce*, меньший единицы, остающийся примерно постоянным при значениях  $[Si]_s > 1,8\%$ .

Если бы при той же основе сплава (железа) проследить поведение элемента X, имеющего примерно такое же сродство к кислороду и пропорционально железу теряющегося испарением, то

связь его количеств в электроде и наплавленном металле представлялась бы прямой 1 на рис. II.36, очень близко расположенной к штриховой прямой 0, проведенной под углом  $45^\circ$  к оси абсцисс (при одинаковом масштабе по обеим осям). Его концентрация в наплавленном металле была бы практически равна его содержанию в металлической части электрода. Перенеся на этот рисунок зависимость  $[Si]_{нм} = f [Si]_э$ , получим ломаную линию 4, в которой горизонтальный участок, совпадающий с осью абсцисс, представляет собой расход кремния на связывание кислорода, т. е.  $[Si]_р$ , по формуле (II.54).

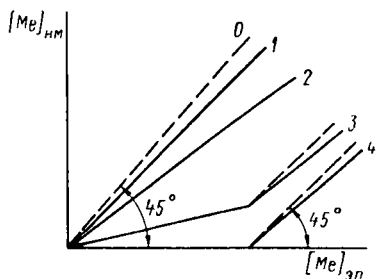


Рис. II.36. Зависимость содержания элемента в наплавленном металле от его содержания в электроде при различных свойствах этого элемента (средство к кислороду, степень испарения при сварке)

Соответственно при недостаточной раскисленности покрытия (в частности, и специально введенными раскислителями) элементы с промежуточной активностью будут давать зависимости, располагающиеся между 1 и 4, качественный их характер показан ломаной линией 3 и прямой 2.

Если зависимости  $[Me]_{нм} = f [Me]_э$  имеют прямолинейный (или почти прямолинейный) характер, то можно эти величины связать уравнением

$$[Me]_{нм} = K [Me]_э, \quad (II.55)$$

где  $K$  — угловой коэффициент, обычно называемый коэффициентом перехода рассматриваемого элемента.

Этот коэффициент не является коэффициентом полезного (для легирования) использования элемента. Фактически при сварке для любого элемента имеются потери (за счет частичного окисления, испарения и пр.), и коэффициент его использования может быть оценен по выражению

$$K' = \frac{G_{Me_{нм}}}{G_{Me_{нм}} + G_{Me_{ок}} + G_{Me_{исп}}}, \quad (II.56)$$

где  $G_{Me_{нм}}$ ,  $G_{Me_{ок}}$ ,  $G_{Me_{исп}}$  — соответственно массы элемента, поступившие в наплавленный металл (полезно используемые) и пошедшие на окисление и испарение (потерянные за процесс сварки).

Однако пользоваться такими коэффициентами  $K'$  (как бы коэффициентами полезного использования элемента в сварочном процессе) неудобно. Обычно в расчетах пользуются значениями коэффициентов перехода согласно формуле (II.55), т. е. в соотношении не масс, а концентраций элементов в электроде и в наплавленном металле. Принципиально эта формула не отражает коэффициента использования элемента. Так, например, в этом случае коэффи-

коэффициент перехода может быть больше единицы (элемент теряется в процессе сварки меньше, чем основа сплава). Такое положение можно наблюдать при рассмотрении коэффициента перехода никеля, который является легирующим элементом в железном сплаве. Действительно, потери никеля на испарение почти равны (в относительных величинах) потерям железа, а его сродство к кислороду меньше, и железо раскисляет образующиеся при сварке окислы никеля, дополнительно увеличивая свои потери на окисление. Однако в большинстве случаев принятая система себя оправдывает достаточной простотой определения коэффициентов перехода (обычное обозначение  $K_{пер}$ ) и их использования в расчетах.

Для случаев, выраженных на рис. II.36 прямыми 1 и 2, значения коэффициентов перехода остаются постоянными, не зависящими от  $[Me]_з$ . Для других элементов (ломаные 3 и 4) это не так. При малых концентрациях  $[Me]_з$  коэффициент перехода либо равен нулю и затем устанавливается практически постоянным (ломаная 4), либо всегда больше нуля, но имеет переменную величину с наличием условного перегиба при каком-то значении  $[Me]_з$  (ломаная 3). Этот случай может быть получен при обработке коэффициента перехода марганца по рис. II.35.

Принципиально коэффициенты перехода элемента из стержня и из покрытия различны, так как при нахождении элемента в покрытиях (обычно в виде порошков) его реакция с недостаточным раскисленным покрытием происходит интенсивнее, чем при его нахождении в стержне. Поэтому более точный расчет концентрации элемента в наплавленном металле может быть произведен по формуле:

$$[Me]_{нм} = [Me]_{эс} K_{пер Me_{эс}} + \frac{G_{эл}}{G_{эс}} P_{Me} [Me]_{P_{Me}} K_{пер Me_{эл}}, \quad (II.57)$$

где  $K_{пер Me_{эс}}$  и  $K_{пер Me_{эл}}$  — соответственно коэффициенты перехода элемента Me из электродного стержня и покрытия;

$\frac{G_{эл}}{G_{эс}}$  — относительный вес покрытия;

$P_{Me}$  — относительное количество в составе покрытия материала, содержащего элемент Me в металлическом состоянии;

$[Me]_{нм}$ ;  $[Me]_{эс}$ ;  $[Me]_{P_{Me}}$  — концентрации элемента Me соответственно в наплавленном металле, электродном стержне и материале  $P_{Me}$ , введенном в покрытие.

В некоторых случаях, например, когда степени легирования относительно невелики и допустимые колебания состава наплавленного металла перекрывают точность расчетов, можно принимать  $K_{пер Me_{эс}} = K_{пер Me_{эл}}$ .

Тогда формула (II.57) упрощается

$$[Me]_{нм} = K_{пер\ Me} \left\{ [Me]_{эс} + \frac{G_{эп}}{G_{эс}} P_{Me} [Me]_{P_{Me}} \right\}. \quad (II.58)$$

В случае, если легирующий элемент вводится только через покрытие (в стержне этот элемент отсутствует), то расчет становится еще проще, так как член  $[Me]_{эс} = 0$ .

Коэффициенты перехода зависят не только от физико-химических свойств элемента, но и от вида покрытия. Так, например, при легировании хромом (до количеств  $[Cr]_{нм} \approx 1\%$ ) через покрытия различных видов были получены следующие значения  $K_{пер}$  [20]:

- для рудно-кислого покрытия типа ОММ-5 — 0,45;
- для покрытия типа ЦМ-7 — 0,60 — 0,65;
- для хорошо раскисленного, на базе карбонатов, ~0,9.

Для наиболее распространенных при сварке легированных и высоколегированных сталей, т. е. в случае, когда наиболее часто применяется дополнительное легирование при достаточно раскисленных ферросилицием и ферротитаном покрытиях фтористо-кальциевого вида, значения коэффициентов перехода ряда элементов приведены ниже [54]:

	$K_{пер}$
Никель . . . . .	0,96—1,0
Хром . . . . .	0,85—0,92
Молибден . . . . .	0,8—0,85
Марганец . . . . .	0,55—0,7
Ванадий . . . . .	0,8—0,85
Углерод (графит) . . . . .	0,45—0,6

Хотя, как отмечалось в § II.3 и II.4, возможно легирование металла за счет обменных реакций с соединениями (главным образом окислами) флюсов-шлаков и даже посредством газовой фазы, наибольшее распространение при сварке имеет легирование вводимыми металлическими составляющими. На этом, кроме рассмотренного выше примера с электродными покрытиями, основано применение керамических флюсов с металлическими добавками; порошковых проволок, когда не удастся иметь проволоки сплошного сечения; порошковых пластинчатых (ленточных) электродов. Применяются также более специфические (и менее строгие по результатам легирования) способы сварки (наплавки) по крупке, по пасте с порошкообразными металлическими составляющими и др.

Все эти способы имеют свои особенности применения, но принципиальные схемы взаимосвязи между количествами вводимых элементов в процесс и конечным их содержанием в наплавленном металле остаются одинаковыми. Что касается химического состава металла швов, то при этом следует учитывать и разбавление наплавленного металла расплавляемым основным, в соответствии с § I.1 и I.2.

## МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

**§ III.1. Сварочные электродные  
(присадочные, наплавочные) материалы  
для сварки плавлением**

В большинстве случаев сварки плавлением и при всех наплавочных работах в расплавляемый основной металл вводится добавочный, наплавляемый; в результате их смешивания образуется сварочная ванна. Кристаллизация металла сварочной ванны вследствие прекращения действия источника тепла или его удаления при перемещении приводит к образованию металла сварного шва или наплавки. Введение добавочного металла осуществляется посредством расплавления сварочным источником тепла специальных сварочных материалов. Они могут вводиться в сварочное пространство как энергетически связанными с источником тепла (дуговая сварка плавящимся электродом и электрошлаковая сварка токоведущим электродом), так и автономно, непосредственно не связанными с источниками тепла (газовая сварка, сварка неплавящимся электродом).

При дуговой сварке плавящимся электродом одна и та же дуга является источником нагрева и плавления как основного металла, так и электрода, расплавление которого и дает необходимый добавочный, наплавляемый металл. Отделить процесс нагрева основного металла от расплавления электрода и, следовательно, наплавления добавочного металла в этом случае практически не удастся, если не создавать искусственными приемами его удаления (стекания в зазор, по вертикальной стенке и пр.). Однако регулирование долей расплавляемых основного и электродного металлов в ванне возможно, в определенных пределах, посредством изменения режимов сварки или наплавки (изменение соотношений толщины свариваемого металла и сечения и формы плавящегося электрода, силы тока и напряжения дуги и пр.).

Аналогичное положение имеет место и при электрошлаковой сварке и наплавке. Токоведущий электрод расплавляется выделяющимся в шлаковой ванне теплом, которое одновременно является источником нагрева и расплавления основного металла. В этом случае распределенность ввода тепла от источника в

Шлаковую ванну достигается как изменениями режима, так и количеством и конструкцией токоведущих электродов.

При газовой сварке и наплавке пламя может быть использовано либо только для разогрева основного металла, либо для нагрева основного и расплавляемого добавочного (присадочного) металла. Соотношения количеств расплавляемого основного и присадочного металлов при таком процессе могут изменяться в более широких пределах. Аналогично можно получить разделение нагрева основного и присадочного металлов при дуговой сварке неплавящимся электродом (сварка и наплавка угольным электродом в воздухе, в углекислом газе, аргоно-дуговая сварка вольфрамовым электродом и др.). При этих способах сварки присадка подается в расплавляющую ее зону источника тепла с такой скоростью, которая необходима для получения того или иного количества наплавленного металла. Наиболее распространена в этом случае ручная подача присадки. Когда необходимое количество присадки по длине шва (наплавки) заранее известно, возможно ее предварительное введение в разделку (или на поверхность, подвергающуюся наплавке) в виде прутков или дозированного количества сыпучих материалов, присадочных колец, вкладышей и пр., вставляемых в стык, и др.

При ручных способах сварки (наплавки), как при дуговой сварке плавящимся электродом, так и при сварке с автономным введением присадки (газовая, аргоно-дуговая сварка и пр.), размеры электродов (или присадки), в том числе и их длина, ограничиваются удобством управления ими, а иногда и особенностями их плавления, связанными с режимом источника тепла. Так, для ручной дуговой сварки длина плавящихся электродов, как правило, не превышает 500 мм, обычно уменьшаясь с уменьшением их рабочего сечения (диаметра). Длина плавящихся электродов может ограничиваться также их теплофизическими свойствами, в частности удельным электрическим сопротивлением металла электрода.

При автономном введении присадки в пламя или дугу неплавящегося электрода для удобства работы длина присадки, вводимой вручную, обычно ограничивается ~800 мм.

Для механизированных способов сварки (наплавки), наоборот, удобнее пользоваться плавящимися электродами (электродной проволокой), а иногда и присадочной проволокой большой длины, позволяющими достаточно длительно выполнять сварочную операцию без перерыва на их смену.

Наиболее распространенным материалом для плавящихся электродов при дуговой сварке, токоведущих электродов при электрошлаковых процессах и в качестве присадок при других способах сварки является проволока, полученная либо горячей прокаткой — катанка, либо волочением после горячей прокатки. Поперечное сечение такой проволоки обычно представляет собой круг. Однако в ряде случаев (главным образом при наплавке) более

целесообразной является другая форма плавящегося электрода, например в виде ленты, которая по мере ее оплавления подается в дугу. Катанка и тянутая проволока в основном изготавливаются из хорошо деформируемых металлов и сплавов (стали, некоторые цветные металлы и сплавы).

В тех случаях, когда металл наплавки должен обладать достаточно высокой твердостью (см. § 1.6), часто примерно такими же характеристиками должны обладать и присадочные материалы. Они обычно характеризуются плохой деформируемостью не только при низких температурах, исключающих применение волочения и холодной прокатки, но даже и при высоких температурах, ограничивающих применение горячей прокатки. Тогда присадочные материалы должны изготавливаться специальными способами: в виде литых стержней или так называемых порошковых проволок и лент, получаемых заформовыванием в оболочку (свернутую по заданной форме тонкостенную ленту) порошков металлургических сплавов, химических соединений и иногда неметаллических составляющих.

Для электрошлаковой сварки кроме обычных проволочных применяются и специальные электроды в виде пластинчатых и пластино-проволочных. При этом пластинчатые электроды представляют собой ленты или вырезанные из листов пластины необходимой формы. Пластино-проволочные электроды, как правило, комбинируются из пластин (иногда переменного поперечного сечения, зависящего от изменения размеров шва в различных участках по его длине) с каналами, в которые подаются обычные электродные проволоки, в ряде случаев отличающиеся по составу от пластин, для регулирования химического состава металла шва. Естественно, что пластинчатые и пластино-проволочные электроды изготавливаются индивидуально для каждого сварного соединения и конструктивно зависят от формы заполняемого при сварке зазора.

В связи с широким применением в сварочной технике проволок в качестве электродных и присадочных материалов во многих странах разработана техническая документация, регламентирующая их поставку. Большинство таких сварочных проволок в Советском Союзе поставляется по ГОСТу. Менее распространенные проволоки поставляются по различным техническим условиям.

Поскольку наибольшее распространение имеют стальные сварные конструкции, регламентация на стальные сварочные проволоки является наиболее распространенной. В СССР первый ГОСТ на сварочную проволоку был разработан и введен в действие примерно 40 лет назад. Он содержал только четыре марки, отличающиеся по составу, в основном по содержанию углерода. В 1943 г. переработанный ГОСТ 2246—43 охватывал 12 различных марок. Ныне действующий ГОСТ 2246—60 «Проволока стальная сварочная» содержит требования к 56 маркам, отличающимся по химическому составу и разделенным на три группы — углеродистые

стали, легированные и высоколегированные. В связи со все возрастающими потребностями сварочного производства ГОСТ 2246—60 в настоящее время перерабатывается в сторону дальнейшего расширения. ГОСТ 2246—60 распространяется на холоднотянутую (волоченную) проволоку и регламентирует их диаметр (0,3; 0,5; 0,8; 1; 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8; 10 и 12 мм), минусовый допуск по диаметру, допуск на овальность сечения, требования к чистоте поверхности, правила приемки и испытаний, а также вида поставки. Химический состав проволок, поставляемых по ГОСТу 2246—60, приведен в приложении 1.

В обозначении марки проволоки по ГОСТу указываются ее назначение (то, что она является сварочной) и система легирования (с принятым условным обозначением элементов и их ориентировочной регламентированной концентрацией). При поставках указывается еще и размер. Например, обозначение 4 Св-08Х20Н9Г7Т, ГОСТ 2246—60, расшифровывается так: диаметр проволоки 4 мм, проволока сварочная, состав: углерода  $\sim 0,08\%$ , хрома (Х)  $\sim 20\%$ , никеля (Н)  $\sim 9\%$ ; марганца (Г)  $\sim 7\%$  и титана (Т) менее 1%. Более точная регламентация допустимых пределов по химическому составу как основных элементов, так и вредных примесей для каждой марки проволоки, приведена в таблице ГОСТа. Повышенные требования к чистоте по вредным примесям для некоторых марок введены в обозначения марки в виде буквы А в конце маркировки. Например, при допуске в углеродистой проволоке  $S \leq 0,04\%$  и  $P \leq 0,04\%$  марка имеет вид Св-08, а в случае требования большей чистоты, т. е. при  $S \leq 0,03\%$  и  $P \leq 0,03\%$  — Св-08А.

Недостатком требований к поставке сварочной проволоки по ГОСТу 2246—60, по сравнению с лучшими образцами, используемыми в мировой практике, является отсутствие требований к поверхностному омеднению проволоки, предохраняющему ее от окисления при обычном хранении и транспортировке. Это приводит к необходимости очистки проволоки самими потребителями: должны быть удалены поверхностная ржавчина, а также остатки смазочных веществ, применяемых при протяжке и консервации. Такая очистка требует применения специальных устройств и дополнительных трудозатрат.

Гостирование присадочных материалов не ограничивается проволокой стальной сварочной. В связи со все расширяющимся применением в сварных конструкциях алюминия и его сплавов разработан и действует ГОСТ 7871—63 «Проволока сварочная из алюминия и алюминиевых сплавов». Этот ГОСТ распространяется на тянутую и прессованную проволоку 11 марок от практически технически чистого алюминия (Св-А97) до сплавов с содержанием легирующих элементов до  $\sim 12\%$  (например, Св-АК12). Стандартом предусматриваются поставка проволоки диаметром от 0,8 до 12 мм, поля допусков по размерам поперечного сечения, требования к поверхности, правила приемки, методы испытания,



упаковка, маркировка, транспортировка. Состав этих проволок по ГОСТу 7871—63 приведен в приложении 2.

В связи с тем, что окисная пленка алюминиевых, а особенно алюминиево-магниевого проволок адсорбирует водород (влагу), вызывающий пористость швов (при их выполнении наиболее распространенным способом—аргоно-дуговой сваркой), для применения при изготовлении ответственных сварных изделий из алюминиевых сплавов такая сварочная проволока должна проходить поверхностную обработку. Наиболее хорошие результаты при этом дает электрополировка, разработанная МАТИ [43]. В связи с большей простотой часто ограничиваются щелочным травлением с последующим осветлением в кислотных растворах. Эти операции осуществляются потребителями (изготовителями сварных конструкций), причем максимальная продолжительность от момента такой дополнительной обработки проволоки до ее использования при сварке регламентируется ведомственными технологическими документами и инструкциями.

Как указывалось выше, некоторые присадочные сварочные материалы могут изготовляться литьем. Для сварки серого чугуна

Таблица III.1

Стандартные стальные ленты, применяемые для наплавки

Марка стали	Химический состав в %										ГОСТ	
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	S		P	на сталь	на ленту	
							не более					
40	0,37—0,45	0,5—0,8	0,17—0,37	≤0,3	≤0,3	—	0,045	0,040	1050—57	2284—43		
65Г	0,6—0,7	0,9—1,2	0,17—0,37	≤0,3	≤0,3	—	0,045	0,040	1050—57	2283—57		
1Х13	≤0,15	≤0,6	≤0,6	12—14	≤0,6	—	0,030	0,035	5632—51	4986—54		
3Х13	0,25—0,34	≤0,6	≤0,6	12—14	≤0,6	—	0,030	0,035	5632—51	4986—54		
0Х18Н9	≤0,07	≤2,0	≤0,8	17—20	8—11	—	0,030	0,035	5632—51	4986—54		
1Х18Н9Т	≤0,12	≤2,0	≤0,8	17—20	8—11	0,6—0,8	0,030	0,035	5632—51	4986—54		
Х13Н4Г9	0,15—0,3	8—10	≤0,8	12—14	4—5	—	0,030	0,060	5632—51	4986—54		
Х20Н80Т	≤0,12	≤0,7	≤0,8	19—23	≥75	≤0,4	0,015	0,020	5632—51	2615—54		

в СССР прутки чугунные сварочные регламентируются ГОСТом 2671—44, который предусматривает две марки прутков, отличающиеся по химическому составу, а также диаметр прутков (от 4 до 12 мм), их длину, требования к поверхности, изломам, правила приемки и пр.

На присадочные сварочные проволоки и литые прутки, применяемые для сварки ряда цветных металлов и сплавов, а также для специальных наплавов, в СССР государственные стандарты не разработаны, и они поставляются либо по неспециализированным стандартам (например, медные проволоки марок М-1, М-2, из медных сплавов — КМцЗ-1 и др.), либо по техническим условиям, согласованным между поставщиком и потребителем. Так, технические условия на поставку присадочных материалов для сварки титана и титановых сплавов, кроме общих требований к составу, размерам и другим техническим характеристикам, обязывают поставщика проводить вакуумный отжиг для снижения содержания в проволоках водорода до оговариваемых пределов, например, менее 0,002% вес. Такое требование вызывается тем, что при обычном металлургическом производстве титановых сплавов и проволок из них, как правило, не обеспечивается содержание в них водорода менее 0,006% вес., что не может гарантировать высокого качества сварки. В частных случаях вакуумный отжиг для обезводороживания может производиться и потребителем. Необходимость в отжиге выявляется при выборочных приемочных испытаниях поставленной проволоки.

Кроме электродных проволок, выпускаемых по ГОСТу и по различным ТУ для наплавки (а в отдельных случаях и для заварки широкой части разделки при сварке металла достаточной толщины), могут применяться в качестве плавящегося электрода металлические ленты. Обычно используются ленты толщиной от 0,4 до ~1,0 мм и шириной 20—100 мм. Для подачи такой ленты в дугу применяются специальные головки сварочных автоматов.

Нашей металлургической промышленностью в очень широком ассортименте выпускаются холоднокатаные ленты, поставляемые по различным ГОСТам. Некоторые характерные марки и составы лент, применяемых для электродуговой наплавки сталей различного состава, приведены в табл. III.1.

### **§ III.2. Специальные электродные (присадочные, наплавочные) сварочные материалы**

Кроме проволок и лент, выпускаемых по ГОСТам металлургической промышленностью, для сварки и наплавки применяются и специализированные материалы, в ряде случаев изготавливаемые непосредственно предприятиями-потребителями.

Как отмечалось ранее, например при электрошлаковой сварке кроме обычных проволочных электродов применяются также

пластинчатые и пластино-проволочные электроды. Их конструкции индивидуальны, связаны с размерами свариваемого стыка. Примеры конструкций пластинчатых и пластино-проволочных электродов приведены на рис. III.1.

Размеры пластинчатых электродов, применяемых при сварке только прямоугольных сечений, имеющих постоянное сечение шва по всей его высоте, должны быть связаны с возможностями сварочного автомата и питающего оборудования. В связи с тем, что сум-

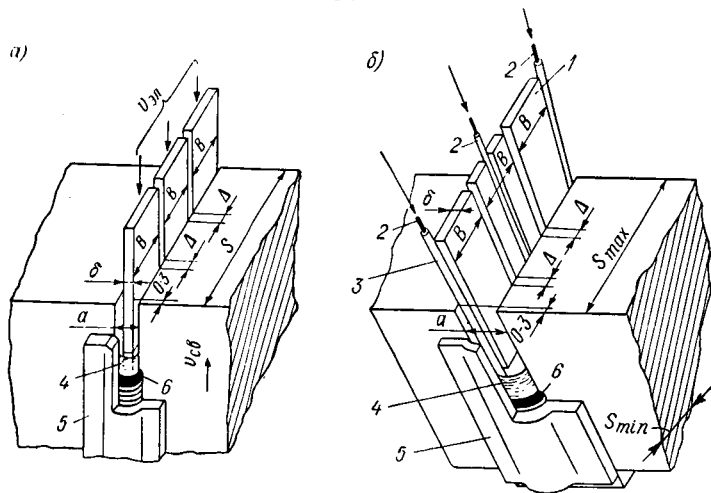


Рис. III.1. Пластинчатые и пластино-проволочные электроды электрошлаковой сварки: а — электрошлаковая сварка пластинчатыми электродами; б — электрошлаковая сварка пластино-проволочными электродами;

1 — пластины; 2 — электродные проволоки; 3 — стальные трубки; 4 — шлаковая ванна; 5 — медные водоохлаждаемые пластины; 6 — металлическая ванна

марное сечение  $n$  пластин (на рис. III.1  $n = 3$ )  $\sum F_s = nF_s = n\delta b$  меньше сечения заполняемого при сварке зазора  $n\delta b < aS$ , а также вследствие того, что фактическое сечение шва больше заполняемого зазора, т. е.  $F_{ш} = kaS$ , где  $k$  — коэффициент, учитывающий общее увеличение сечения шва по отношению к свариваемому элементу, обычно равный 1,05—1,1, пластинчатые электроды по мере их расплавления должны подаваться в зону сварки с некоторой скоростью  $v_{под} > v_{св}$  (где  $v_{св}$  — скорость выполнения шва в см/сек, м/ч). Для того чтобы суммарный объем расплавляющегося пластинчатого электрода был достаточен для заполнения объема зазора, величина необходимой подачи пластинчатых электродов в зону расплавления должна быть согласована с максимальным возможным ходом расплавленной части пластинчатых электродов, обеспечиваемых аппаратом. Таким образом, конкретные размеры сечения отдельного пластинчатого электрода необходимо рассчитывать для каждой конкретной свариваемой детали с учетом ряда факторов [18, 77].

Пластино-проволочные электроды (рис. III.1, б) применяются, в частности, при необходимости выполнения шва с переменным сечением по его высоте. В этом случае разница между сечением зазора, который должен быть заполнен, и сечением пластин расплавляющихся электродов компенсируется не их подачей в зону плавления, а подаваемыми в эту зону дополнительными присадочными проволоками. Подача плавящихся токоведущих проволок осуществляется при этом по специальным каналам, например в виде трубок, приваренных к пластинам. Пластины остаются неподвижными в течение всего процесса сварки, а подающим механизмом в зону сварки перемещаются только плавящиеся проволоки.

Пластины пластинчатых и пластино-проволочных электродов изготавливаются литьем или вырезкой из листового проката. Химический состав шва регулируется как составом пластин, так и составом плавящихся проволок (при пластино-проволочных электродах) и соотношением долевого участия расплавляемых пластин и проволок в наплавленном металле.

Технологически весьма гибкими для получения различного состава наплавленного металла и его защиты от газов являются специальные сварочные материалы, обычно называемые порошковыми проволоками. Как указывалось выше, для изготовления сплошной тянутой проволоки необходима достаточно высокая пластичность металла (сплава), из которого она производится. В ряде случаев такие сплавы не могут обеспечить необходимых свойств наплавки. Изготовление требуемого состава присадок литьем позволяет получать отдельные стержни относительно небольшой длины, ограничивающей целесообразность (а иногда и возможность) их использования при механизированных способах сварки или наплавки, например при автоматической или полуавтоматической сварке под флюсом или в защитных газах. Такие механизированные процессы сварки и наплавки могут осуществляться порошковыми проволоками, представляющими собой оболочку из хорошо деформируемой при нормальных температурах ленты и сердцевину из порошкообразных материалов (рис. III.2).

Изготовление таких проволок осуществляется по следующей принципиальной технологии. В специальное формирующее устройство подается легко деформируемая лента шириной  $B$  и толщиной  $\delta$ . Первоначально (обычно валками специальной формы) она деформируется в виде раскрытого сверху желоба, в который из расположенного сверху бункера сыпается порошок шихты. Последующие формирующие устройства, загибая верхние края желоба вокруг порошкообразной сердцевины, создают порошковую проволоку достаточно большой протяженности. При дальнейшем расплавлении такой проволоки, например сварочной дугой, состав наплавленного металла будет определяться сплавлением металлических составляющих оболочки и сердцевины.

Соотношения (весовые) количеств металла оболочки и сердцевины определяются начальными размерами ленты ( $B$  — определяет возможный наружный диаметр сформированной оболочки, а  $\delta$  — внутренний диаметр трубки, заполняемой порошком), плотностью металла ленты и насыпным весом порошка. Последний зависит как от состава порошка, так и от его грануляции и степени уплотнения при засыпке и формовке. При обычных конструкциях порошковых проволок со стальной оболочкой и применяемых составах порошковой сердцевины относительный вес порошковых

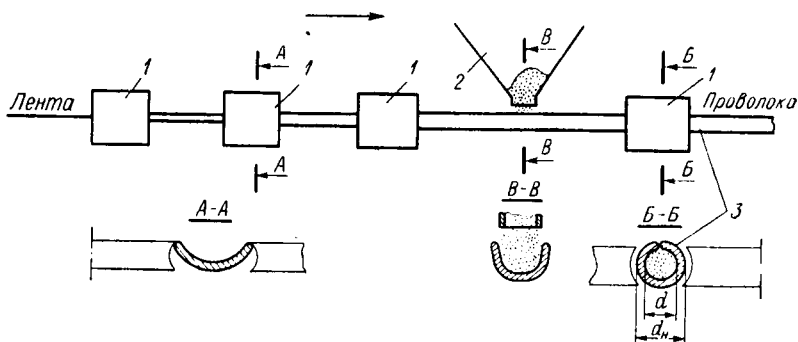


Рис. III.2. Схема изготовления порошковых проволок:

1 — формующие валки; 2 — бункер; 3 — порошковая проволока

материалов в проволоке составляет  $\frac{G_n}{G_A + G_n} = 0,15 \div 0,45$  (где  $G_n$  — вес порошка в сердцевине проволоки на единице ее длины и  $G_A$  — вес оболочки — ленты на той же длине проволоки).

Такая порошковая проволока может создаваться непосредственно во время выполнения сварки (наплавки) специализированным сварочным или наплавочным автоматом, снабженным устройством для размотки ленты с катушки, бункером с сыпучей шихтой и необходимыми простейшими формующими устройствами (например, наплавочный автомат, разработанный в ОРГГРЭС Б. Н. Пановым). Порошковая проволока сразу после формующего устройства попадает в сварочную головку и переплавляется дугой. Скорость изготовления проволоки в этом случае равна скорости ее расплавления дугой.

Институтом электросварки разработан способ изготовления порошковых проволок, пригодных для их хранения и транспортировки [68]. В этом случае порошковая проволока изготавливается централизованно (обычно на металлургическом заводе) с дополнительной ее протяжкой после первичной формовки и намоткой в катушки (бухты). Полученная первичной формовкой согласно рис. III.2 проволока с диаметром  $d_{n1} \approx \frac{B}{\pi}$  дальше протягивается через волочильные фильеры с уменьшающимися диаметрами до



$\kappa_1^{(a)}, \dots, \kappa_n^{(a)}, \kappa_1^{(i)}, \dots, \kappa_n^{(i)}$  — концентрации элементов в соответствующих материалах, вводимых в шихту порошкообразной составляющей проволоки.

Если легирующий элемент, например  $i$ , вводится только одной составляющей порошка (например,  $\kappa_n$ ), то соотношение между необходимой концентрацией этого элемента в наплавленном металле  $A_i$  и количеством материала  $\kappa_n$ , вводящего этот элемент в шихту порошка, определяется простой формулой

$$A_i = \frac{\kappa_n x_i K_{пер i}}{100} \frac{G_n}{G_{nn}}, \quad (III.2)$$

откуда

$$x_i = 100 \frac{A_i}{\kappa_n K_{пер i}} \frac{G_{nn}}{G_n}. \quad (III.3)$$

Для оценки состава наплавки (а не наплавленного металла) необходим учет долевого участия  $\psi$  расплавленного основного металла в слое наплавки (см. § 1.2).

Произведем расчет для  $\psi = 0$  применительно к нелегированной ленте и необходимому составу наплавленного металла: 16—18% Cr; 2,5—3,5% C; 0,4—0,6% Ti и 0,5—0,7% В. Легирование будем осуществлять порошковыми материалами, указанными в табл. III.2.

В связи с наличием в шихте металлов, имеющих большую плотность, относительный вес сердцевины должен быть принят (для ориентировочного расчета) близким к верхнему пределу  $\frac{G_n}{G_{nn}}$ . Предположим, что после начального изготовления проволоки мы его уточнили экспериментально и получили  $\frac{G_n}{G_{nn}} = 0,43$ . Для того чтобы привести сразу конечный расчет, возьмем эту величину  $\frac{G_n}{G_{nn}}$  (если бы мы ее приняли ошибочно, то после эксперимента по определению  $\frac{G_n}{G_{nn}}$  необходим был бы перерасчет).

Коэффициенты перехода легирующих элементов, взятые из предварительных опытов по применению подобных же порошковых проволок при сварке под наечаемым флюсом и принятые для дальнейшего расчета, равны:

	$K_{пер}$
Углерод . . . . .	0,65
Хром . . . . .	0,92
Титан . . . . .	0,36
Бор . . . . .	0,85

Таблица III.2  
Состав шихтовых материалов  
порошковой проволоки

Порошкообразный материал	Химический состав в % вес. по основным легирующим элементам			
	C	Cr	Ti	B
Феррохром углеродистый	7,12	72,1	—	—
Ферротитан	0,10	—	22,07	—
Ферробор	—	—	—	7,31
Графит серебристый	70,0	—	—	—

Произведем расчет применительно к минимальному и максимальному допустимым пределам содержания легирующих элементов в наплавке:

$$X_{\text{FeCr}_{\min}} = \frac{16}{72,1 \cdot 0,92} 100 \frac{1}{0,43} = 56,1\%;$$

$$X_{\text{FeCr}_{\max}} = \frac{18}{72,1 \cdot 0,92} 100 \frac{1}{0,43} = 63,1\%;$$

$$X_{\text{FeTi}_{\min}} = \frac{0,4}{27,07 \cdot 0,36} 100 \frac{1}{0,43} = 9,56\%;$$

$$X_{\text{FeTi}_{\max}} = \frac{0,6}{27,07 \cdot 0,36} 100 \frac{1}{0,43} = 14,3\%;$$

$$X_{\text{FeB}_{\min}} = \frac{0,5}{7,31 \cdot 0,85} 100 \frac{1}{0,43} = 18,71\%;$$

$$X_{\text{FeB}_{\max}} = \frac{0,7}{7,31 \cdot 0,85} 100 \frac{1}{0,43} = 26,21\%.$$

Так как феррохромом и ферротитаном уже вводится в шихту углерод, сперва определим это введенное ими количество:

$$A_{\text{C}_{\text{FeCr}_{\min}}} = \frac{56,1 \cdot 7,12 \cdot 0,65}{100} 0,43 = 1,12\%;$$

$$A_{\text{C}_{\text{FeCr}_{\max}}} = \frac{6,31 \cdot 7,12 \cdot 0,65}{100} 0,43 = 1,25\%;$$

$$A_{\text{C}_{\text{FeTi}_{\min}}} = \frac{9,56 \cdot 0,1 \cdot 0,65}{100} 0,43 = 0,03\%;$$

$$A_{\text{C}_{\text{FeTi}_{\max}}} = \frac{14,3 \cdot 0,1 \cdot 0,65}{100} 0,43 = 0,04\%;$$

$$\sum C_{\text{FeCr, FeTi}_{\min}} = 1,15\%; \quad \sum C_{\text{FeCr, FeTi}_{\max}} = 1,29\%.$$

Сосчитаем, сколько же надо добавить графита для получения среднего количества углерода в наплавке (возьмем его допустимые пределы 3—3,5%):

$$X_{\text{граф}_{\min}} = \frac{3,00 - 1,15}{7,00 \cdot 0,65} \frac{1}{0,43} = 9,45\%;$$

$$X_{\text{граф}_{\max}} = \frac{3,50 - 1,29}{7,00 \cdot 0,65} \frac{1}{0,43} = 11,3\%.$$

Суммарное количество материалов, которые необходимо ввести в порошковую шихту, по минимальному и максимальному пределам получается:

$$\sum X_{\min} = 56,1 + 9,56 + 18,71 + 9,45 = 93,82\%;$$

$$\sum X_{\max} = 63,1 + 14,3 + 26,21 + 11,3 = 114,91\%.$$



Естественно, что максимального легирования путем применения такой порошковой проволоки получить нельзя ( $\sum X_{\max} = 114,91\%$ ). Минимальное легирование наплавки такой проволокой получить можно ( $\sum X_{\min} = 93,82\%$ ), добавив в шихту  $100 - 93,82 = 6,18\%$  железного порошка. Легирование более минимального (но меньше максимального) можно получить, пересчитав шихту на 100% без добавления железного порошка:

$$X_{\text{FeCr}} = \frac{56,1 \cdot 100}{93,82} = 59,7\%;$$

$$X_{\text{FeTi}} = 10,2\%; \quad X_{\text{Feв}} = 19,9\%; \quad X_{\text{гراف}} = 10,2\%.$$

Тогда ожидаемое количество хрома в наплавленном металле будет

$$\begin{aligned} A_{\text{Cr}} &= [\text{Cr}]_{\text{км}} = \frac{X_{\text{FeCr}} K_{\text{CrFeCr}} K_{\text{непCr}}}{100} \frac{G_n}{G_{\text{нн}}} = \\ &= \frac{59,7 \cdot 72,1 \cdot 0,92}{100} 0,43 \approx 17\%. \end{aligned}$$

Аналогично рассчитывается и возможное легирование другими элементами.

Сводное сопоставление заданных пределов расчетного и экспериментально определенного составов металла, наплавленного порошковой проволокой, приведено в табл. III.3.

Т а б л и ц а III.3

Сравнение состава наплавленного металла, определенного расчетом, с составом, полученным экспериментально

Состав	Сопоставляемые величины в % вес.		
	Допуск по заданию	Расчетная концентрация	Результат анализа выполненных наплавов
Углерод	2,5—3,5	3,18	3,0—3,5
Хром	16—18	17,0	16,5—17,5
Титан	0,4—0,6	0,42	0,38—0,45
Бор	0,5—0,7	0,53	0,5—0,6

Как следует из приведенного сопоставления, экспериментальные наплавки дали хорошее совпадение с расчетом.

В настоящее время порошковые проволоки широко используются для наплавки слоев с особыми свойствами. В табл. III.4 приведены некоторые рекомендуемые составы порошковых проволок, часть из которых производится металлургической промышленностью.

## Рекомендуемые составы порошковых проволок

Марка проволоки	Содержание элементов (соединений) в %											Марка флюса
	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	V	Ti	S		Na <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>	
									не более	P		
Для наплавки под флюсом												
ПП-3Х2В8	0,65	≤0,3	1,45	2,8	—	9,75	0,30	—	0,04	0,04	2,0	АН-20
ПП-Х12ВФ	2,4	≤0,4	0,60	15,0	—	1,30	0,30	—	0,04	0,04	2,8	АН-30
ПП-У15Х17Н2	2,0	≤0,7	0,8	20,0	2,0	—	—	—	0,04	0,04	3,0	АН-20
ПП-Х10В14	4,0	≤0,4	≤0,4	10,0	—	14,5	—	—	0,04	0,04	3,0	АН-20
ПП-Р18	1,1	≤0,4	≤0,4	4,3	—	19,0	1,5	—	0,04	0,04	4,0	АН-21М
ПП-Г13А	1,2	≤0,5	15,3	—	—	—	—	—	0,04	0,027	2,0	АН-10А
Для наплавки в углекислом газе												
ПП-4Х2В8Т	0,5	≤0,3	1,0	3,0	—	10,0	0,35	1,0	0,04	0,04	0,6	—
ПП-У45Х25Г6Т	5,3	0,9	7,0	25,0	—	—	—	1,0	0,04	0,05	—	—
ПП-Р18Т	1,3	≤0,5	≤0,4	4,7	—	20,0	1,4	1,0	0,04	0,04	0,4	—
ПП-Х12ВФТ	2,5	0,6	≤0,4	15,0	—	1,3	1,0	1,0	0,04	0,04	0,5	—

Кроме порошковых проволок для наплавов в последнее время получили развитие и порошковые проволоки для полуавтоматической сварки сталей общего назначения. Разработан ряд таких порошковых проволок для сварки без дополнительной защиты от воздуха, а также для сварки в защитном углекислом газе [58]. В этих случаях в состав порошковой шихты кроме ферросплавов, железного порошка вводятся и неметаллические порошки, составляющие основу шлаков, защищающих и обрабатывающих металл в процессе сварки. Относительный вес шлакообразующих составляющих к весу проволоки обычно равен 10—14%. Институтом электросварки им. Е. О. Патона разработан ряд составов таких проволок (ПП-АН1, ПП-АН2, ПП-АН3), характеризующихся различной основой образующихся шлаков ( $\text{CaO} \times \text{SiO}_2 \cdot \text{CaF}_2$ , на базе  $\text{TiO}_2$  и др.).

Такие (или подобные им) проволоки применяются и в других странах.

Современные конструкции порошковых проволок весьма разнообразны. Некоторые типовые поперечные сечения порошковых проволок приведены на рис. III.3. При этом относительно большая равномерность распределения металлической ленты по сечению (не только по периферии, как, например, на рис. III.3, а, но и в центральной части, подобно типу з) позволяет получать более равномерное плавление проволоки при сварке.

Аналогично порошковой проволоке для наплавов может применяться порошковая лента. В этом случае порошком заполняется полость между двумя тонкими полосами, гофрируемыми в специальных валках для создания необходимой жесткости и завальцовываемых по продольным кромкам после заполнения порошком [68]. Такая порошковая лента либо расплавляется специальным автоматом сразу после изготовления, либо изготавливается централизованным путем, сворачивается в рулоны, транспортируется к потребителю и применяется для наплавки автоматами, снабженными устройствами для подачи ленточного плавящегося электрода [68].

В некоторых случаях для наплавки могут применяться ленты, изготавливаемые бесслитковой прокаткой жидкого металла, заполняющего клиновидный зев валков-кристаллизаторов, или ленты, полученные прокаткой порошков, подаваемых из бункера в валки. Такие ленточные электроды имеют, как правило, относительно

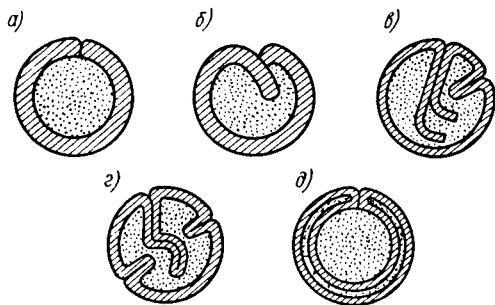


Рис. III.3. Конструкции (сечения) порошковой проволоки: а, б, в, г — одинарные; д — двойная

небольшую пластичность, и их применение весьма ограничено.

Для выполнения сварных соединений независимыми источниками тепла (например, при аргоно-дуговой сварке неплавящимся электродом, при электроннолучевой сварке и пр.) иногда является технологически целесообразным введение присадочных материалов не извне, а как бы совместно с расплавляемым основным металлом. Тогда присадка при сборке под сварку тем или иным способом фиксируется по отношению к кромкам (поверхности) основного металла, которые будут расплавляться сварочным источником тепла. Например, при аргоно-дуговой сварке стыков труб, при требовании получения почти гладкого формирования обратной (внутренней, недоступной для подварки) стороны корневого шва, целесооб-

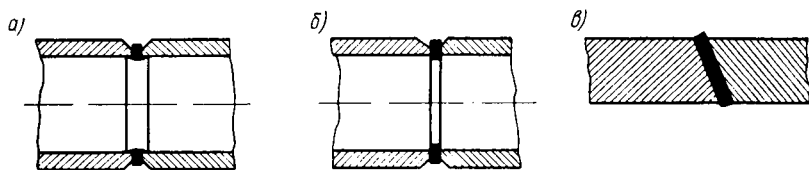


Рис. III.4. Примеры присадочных колец (а, б) и вставок (в)

разно уже при сборке под сварку использовать присадочные кольца. Некоторые решения по этому специфическому виду присадок приведены на рис. III.4. Конкретные размеры таких присадочных колец и химический состав металла, из которого они изготовляются, определяются конкретными условиями: толщиной и составом свариваемого металла, отработанным режимом сварки, обеспечивающим и полное расплавление присадки, и необходимое расплавление кромок основного металла, размером жидкой ванны, удерживаемой по форме нижней поверхности в пределах требований, предъявляемых к этому сварному соединению, за счет поверхностного натяжения (или иногда и поддува, например, аргона во внутреннюю полость свариваемой трубы). Состав присадочных колец для регулирования химического состава такого корневого шва может отличаться от состава свариваемых труб [54].

Для регулирования состава металла при электроннолучевой сварке разнородных металлов Ф. Г. Гонсеревским предложено способ введения в стык при сборе под сварку присадочных вставок. На рис. III.4, в показан случай использования такой присадочной вставки при сварке стыков листов. Комбинируя состав и доленое участие присадки в расплавляемом лучом металле, что определяется связью геометрических размеров присадочной вставки и расплавляемыми сечениями обоих свариваемых элементов, можно регулировать средний химический состав металла шва, его технологическую прочность (сопротивляемость образованию трещин при сварке) и эксплуатационные свойства.

Аналогично решаются и некоторые задачи наплавки. Так, в простейшем случае на наплавляемую поверхность насыпается крупка (порошкообразный присадочный, наплавочный металл), которая затем расплавляется дугой неплавящимся электродом. Такие наплавочные материалы, которые по своим свойствам не могут быть изготовлены в виде стержней, например сталинит, ВИСХОМ-9, позволяют получать наплавки с довольно грубой поверхностью, но все же удовлетворяющие некоторым специфическим требованиям эксплуатации ряда деталей (см. § 1.6). Однако при более высоких требованиях к составу, качеству поверхности и свойствам наплавки, например для некоторых поверхностей клапанов двигателей внутреннего сгорания и других изделий, более целесообразным является введение наплавочного сплава, предварительно изготовленного по соответствующей форме и укладываемого на поверхность, подлежащую наплавке. Пример такого использования наплавочных вставок показан на рис. III. 5. Расплавляя дугой неплавящимся электродом в аргоне такую присадочную вставку на всю ее толщину и обеспечивая при этом (подбором режима) и оплавление основного металла под вставкой, можно получить валик наплавки, состав которого зависит от составов присадки и основного металла и их долевого участия в получаемом валике [см. формулу (1.4)].

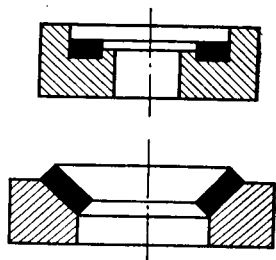


Рис. III.5 Расплавляемые присадочные накладки

Такие присадочные вставки (возможны пластинчатые накладки и т. п.) можно применять даже тогда, когда их состав и форму нельзя или очень затруднительно получить обычными методами — литьем, горячим деформированием, механической обработкой из заготовок и др. В этих случаях присадочные вставки могут создаваться методами порошковой металлургии — прессованием порошковой шихты в специальных штампах и обычно последующей их термической обработкой для спекания и повышения прочности с целью предотвращения рассыпания при транспортировке, сборке.

Принципиально аналогичным образом могут изготавливаться из металлических порошков и присадочные стержни диаметром  $\sim 5-6$  мм. Варьируя составы порошков, возможно получать практически любой состав таких присадочных стержней для целей аргоно-дуговой сварки или наплавки. Этот метод весьма удобен для разработок новых наплавочных составов и может оказаться целесообразным при необходимости использования небольших количеств наплавочных материалов, когда их изготовление централизованными методами нерационально.

Таким образом, специальные присадочные материалы достаточно широкой номенклатуры эффективно используются для решения различных задач сварочной техники.

### § III.3. Сварочные (штучные) плавящиеся электроды

Несмотря на широкое применение различных механизированных способов сварки плавлением, наибольшее количество сварных конструкций изготавливается и по настоящее время методом ручной дуговой сварки. Ручная дуговая сварка выполняется штучными электродами, конструктивно представляющими собой металлический стержень с нанесенным на его боковую поверхность специальным покрытием соответствующего состава. Один из концов стержня длиной  $\sim 30$  мм освобожден от покрытия для его зажатия в электрододержатель с обеспечением электрического контакта.

Второй конец слегка очищается для обеспечения возможности зажигания дуги посредством контакта со свариваемым изделием. Такой электрод изображен на рис. III.6.

Плавящиеся штучные электроды должны обладать достаточно хорошими технологическими характеристиками и обеспечивать получение наплавленного металла необходимого состава, структуры и свойств при минимальном (допустимом) количестве внутренних пороков (пористости, шлаковых включений).

Технологические характеристики электродов включают в себя:

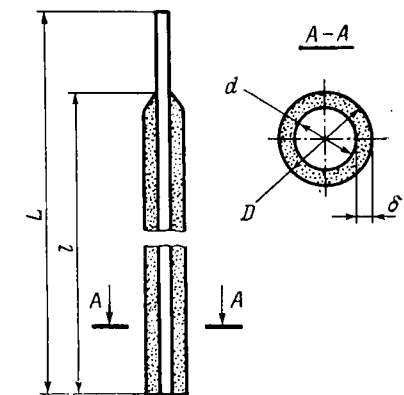


Рис. III.6. Плавящийся штучный электрод с покрытием

а) возможность устойчивого горения дуги и плавления электрода на постоянном (при прямой или обратной полярности) или переменном токе или же обеспечивать универсальность по устойчивости горения дуги вне зависимости от рода тока;

б) достаточную защиту расплавляемого металла электрода и сварочной ванны от накопления в них вредных примесей (кислорода, азота, серы и др.); достаточная изоляция от воздуха (от окисления и азотирования) осуществляется при этом обычно комбинированной газовой и шлаковой защитой;

в) возможность выполнения сварки при различном расположении швов в пространстве; при этом кроме универсальных электродов, позволяющих выполнять нижние, вертикальные, горизонтальные и потолочные швы, могут применяться электроды и со специализированным назначением, например только для нижних швов, но создающие при этом некоторые преимущества (увеличение провара, производительности и пр.);

г) возможность при применении оптимальных режимов сварки получения хорошо сформированных валиков (швов) с достаточной

мелкочешуйчатой наружной поверхностью и плавными переходами от шва к расплавляющимся кромкам основного металла;

д) обеспечение легкой удаляемости с поверхности швов шлака путем применения простейших инструментов (например, стальной щетки, остроконечного ручного легкого молотка);

е) исключение при сварке такого выделения газов и пылевидных частиц, которое превышает установленные нормы, с точки зрения обеспечения санитарно-гигиенических условий для персонала, выполняющего сварку;

ж) обеспечение возможно высокой производительности сварки (уменьшение основного времени выполнения сварочной операции за счет достаточно быстрого наплавления металла; для некоторых случаев — увеличение провара кромок свариваемого металла) и сопутствующих технологических операций (очистка металла от брызг и др.);

з) достаточную стойкость покрытий против механических повреждений (осыпание, откалывание при относительно легких ударах, в процессе нагрева электрода при сварке и др.) и недопустимого (безвозвратного) ухудшения свойств при оговоренных условиях хранения.

Свойства наплавленного плавящимися электродами металла определяются как его химическим составом и структурой, так и наличием или отсутствием внутренних пороков. Естественно, что для сварки металлов, и в частности сталей различных составов и свойств, как правило, требуются различные электроды. В связи с большим разнообразием металлов и сплавов, применяемых для изготовления сварных конструкций общего или специализированного назначения, электроды для их сварки также чрезвычайно разнообразны. Обычными характеристиками электродов, с этой точки зрения, являются обеспечение оговориваемого диапазона возможных колебаний химического состава наплавленного металла, гарантирование определенных его свойств, как правило, прочностных (временного сопротивления, относительного удлинения, вязкости и др.), а также иногда и специальных свойств: сопротивляемости различным видам коррозии в составе сварных соединений; длительной прочности, сопротивления ползучести и пр. при высоких температурах и различной длительности испытаний; твердости, износостойкости и ряда других.

К наплавленному металлу, как правило, предъявляются и требования достаточной сплошности и технологической прочности. Металл, получаемый в результате расплавления электрода в сварочных условиях, не должен иметь значительных пор и шлаковых включений (плотность его обычно должна быть сопоставима с плотностью прокатанного металла) и обладать достаточно высокой сопротивляемостью образованию горячих и холодных трещин в сварных соединениях.

Комплекс технологических свойств электродов, состава и качества наплавленного металла обеспечивается как составом элек-

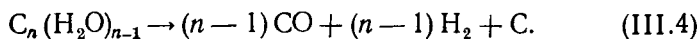
тродных стержней, так и композицией электродных покрытий. При этом, как правило, основу химического состава наплавленного металла обеспечивают выбором состава стержня электрода, хотя его можно в случае необходимости существенно изменить в желаемом наплавлении и подбором состава покрытия (главным образом введенными в него порошкообразными металлическими составляющими). Несмотря на то, что в ряде случаев обеспечение состава наплавленного металла за счет выбора состава стержня дает наиболее устойчивые результаты, легирование наплавленного металла посредством покрытий весьма распространено как для электродов общего, так и для электродов специального назначения.

Технологические характеристики в основном обеспечиваются составом покрытий, хотя, прямо воздействуя на характер металлургической обработки металла при сварке, покрытия существенно влияют и на качество наплавленного металла, а следовательно, металла сварных швов и на свойства соединений.

Рассмотрим некоторые количественные характеристики современных электродных покрытий.

Как указывалось выше, большинство применяемых электродных покрытий построено на основе газо-шлаковой защиты металла от окислительного и азотирующего воздействия воздуха. В качестве газов, защищающих реакцию зону сварки и расплавленный металл, главным образом применяются продукты распада органических соединений или карбонатов.

Органические соединения при температуре несколько выше  $200^{\circ}\text{C}$  разлагаются по схеме [49]



При распаде наиболее обычного соединения такого типа —  $C_{12} (H_2O)_{11}$  из 1 г выделяется  $\frac{308}{342}$  CO, или применительно к нормальным условиям (давление 1 кг/см<sup>2</sup>, температура  $0^{\circ}\text{C}$ ),  $\sim 720$  см<sup>3</sup>, и  $\frac{22}{342}$  H<sub>2</sub>, или  $\sim 725$  см<sup>3</sup>. Эти же цифры характерны и для других углеводов, например для  $C_{24} (H_2O)_{23}$  получается  $\sim 730$  см<sup>3</sup> CO и  $\sim 740$  см<sup>3</sup> H<sub>2</sub>. Таким образом, применительно к нормальным условиям 1 г органических соединений выделяет  $\sim 1450$  см<sup>3</sup> окиси углерода и водорода. При этом остающийся углерод в количестве  $\frac{12}{342} \div \frac{12}{702} = 0,035 - 0,016$  г либо может окислиться до CO, либо раствориться в металле.

Реакция (III.4) происходит вблизи торца электрода вследствие нагрева покрытия при сварке. Выделяющиеся газы в значительной степени попадают в дуговой промежутке, нагреваются, расширяются и вместе с относительно холодными частями газов, отходящими с конвективными потоками от дуги в стороны, оттесняют окружающий воздух. Рассчитать температуры для различных



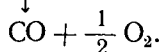
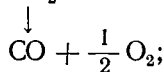
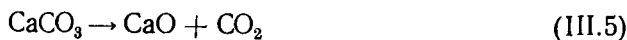
объемов газа, выделяющихся из покрытия, довольно трудно (некоторая доля, попавшая в столб дуги, может нагреться свыше  $3000\text{--}4000^\circ\text{C}$ , а часть, проходящая сверху и по периферийным областям, остается почти холодной, например нагревается до  $\sim 100\text{--}200^\circ\text{C}$ ). Однако, вероятно, не очень ошибочным будет принять среднюю температуру выделяющихся из покрытия окиси углерода и водорода в пределах  $550\text{--}800^\circ\text{C}$ . Так как при нагреве на  $1^\circ\text{C}$  газы расширяются на  $\frac{1}{273} V$ , то такой нагрев приведет к 3—4-кратному увеличению объема газа, т. е. при распаде 1 г органических соединений отеснение воздуха осуществляется примерно  $3000\text{--}4000\text{ см}^3$  нагретых окиси углерода и водорода.

Некоторые характерные расчетные величины по газовыделению из органических составляющих для типовых составов руднокислых покрытий, применяемых в СССР, приведены в табл. III.5. При этом для расчетов удельного выделения газов к расплавленному металлу приняты наиболее типичные диаметры электродных стержней 4 и 5 мм.

Такое количество защитных газов обеспечивает достаточную изоляцию реакционного пространства от воздуха и азотирование металла является очень небольшим ( $[N_2]_{\text{нм}} \approx 0,02\%$ , в сравнении с исходным  $[N_2] \approx 0,01\%$ ), практически допустимым.

Аналогичным является и газовыделение из органических составляющих покрытий рутилового типа, когда их содержание в шихте покрытия обычно находится на уровне 2—3%.

Вторым видом создания газовыделения электродными покрытиями является диссоциация карбонатов:



Из этих карбонатов наиболее распространены в электродных покрытиях  $\text{CaCO}_3$  (мрамор, мел, известняк), хотя в некоторых случаях используются и комбинированные материалы (доломит, содержащий и  $\text{CaCO}_3$ , и  $\text{MgCO}_3$ ). Применительно к  $\text{CaCO}_3$  при молекулярном весе этого соединения  $40 + 12 + 48 = 100$  относительное (по весу) количество выделяющегося  $\text{CO}_2$  равно 0,44 (44%), т. е. весьма значительно. Диссоциация  $\text{CaCO}_3$  при парциальном давлении в газовой фазе  $p_{\text{CO}_2} \approx 1\text{ кг/см}^2$  начинается при  $\sim 900^\circ\text{C}$ . В многокомпонентных системах покрытий, при характерных для воздуха значениях  $p_{\text{CO}_2} \approx 0,03\text{--}0,05\text{ кг/см}^2$  диссоциация  $\text{CaCO}_3$  начинается при меньших температурах, обычно около  $600^\circ\text{C}$ . Значит, и в этом случае газовыделение из покрытия, содержащего

## Характерные значения газовой выделения из органических составляющих покрытий руднокислотного типа

Марка электрода	Диаметр электрода, мм	Вес металлического стержня на 1 лог. см электрода в г	Относительный вес покрытия на 1 лог. см электрода $\frac{G_{эл}}{G_{эс}}$	Вес покрытия на 1 лог. см электрода в г	Относительный вес органических составляющих в %		Объемное количество органических составляющих покрытия к 1 г стержня в г	Количество выделяющихся из покрытия газов на 1 г металла в см <sup>3</sup> /г	
					в шихте по рецепту	в покрытии (с учетом жидкого стекла*)		при нормальных условиях	при средней температуре
ЦМ-7	4	0,97	0,4	~0,4	5	~4,5	~0,019	28	84
	5	1,54	0,4	~0,6	5	~4,5	~0,019	28	84
ОММ-5	4	0,97	0,35	~0,34	9	~7,0	~0,021	30	90
	5	1,54	0,35	~0,52	9	~7	~0,021	30	90

\* Перерасчет к покрытию с учетом сухого остатка жидкого стекла в количестве 12—14% к весу шихты.

Количество выделяющегося CO<sub>2</sub> из мрамора электродных покрытий в процессе сварки

Марка покрытия	Диаметр электрода, мм	Вес металла стержня в г	Относительный вес покрытия на 1 лог. см электрода $\frac{G_{эл}}{G_{эс}}$	Вес покрытия на 1 лог. см электрода в г	Относительный вес мрамора в покрытии в %		Количество выделяющегося CO <sub>2</sub> на 1 г металла стержня в см <sup>3</sup> /г
					в сухой шихте	с учетом жидкого стекла	
Типа УОНИ-18	4	0,97	0,33	~0,33	50	45	~137
	5	1,54	0,33	~0,50	50	45	~137
Условная	4	0,97	0,35	~0,34	30	27	~0,087
	5	1,54	0,35	~0,52	30	27	~0,087

\* С учетом содержания СаСО<sub>3</sub> в мраморе ~93%.

$\text{CaCO}_3$ , будет происходить вблизи торца электрода, у которого горит дуга, т. е. вблизи реакционной зоны сварочной операции.

Расчеты показывают, что применительно к нормальным условиям из 1 г  $\text{CaCO}_3$  выделяется  $\frac{44}{100} \cdot \frac{22400}{28} = 340 \text{ см}^3$  газов или при принятых выше температурах среднего подогрева газов до  $550\text{—}800^\circ \text{C}$  соответственно  $1000\text{—}1400 \text{ см}^3$ .

Типичные относительные количества выделяющегося при сварке  $\text{CO}_2$  для типовых содержаний мрамора в шихте покрытия 50 и 30% приведены в табл. III.6.

Как показывает расчет, при обычном количестве карбонатов в шихте покрытий общее количество выделяющегося  $\text{CO}_2$  даже несколько больше, чем  $\text{CO} + \text{H}_2$  из покрытий, содержащих органические составляющие. Это также обеспечивает достаточное отеснение воздуха от реакционной зоны сварки, и конечное содержание азота в наплавленном металле обычно примерно такое же, как при сварке электродами с органическими составляющими в покрытии.

Наибольшую относительную часть покрытий, как правило, составляют шлакообразующие. Получающийся в результате сварки шлак в основном формируется за счет покрытия, хотя нельзя исключать изменения состава шлака в результате пополнения его окислами и другими соединениями (сульфидами и пр.), поступающими из металлических составляющих покрытия, металла стержня или основного, свариваемого в результате реакций, проходящих при сварке.

Шлакообразующие, вводимые в состав покрытия, весьма разнообразны. Это и различные окислы —  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и др., галогенные соединения, например  $\text{CaF}_2$ , сложные соединения —  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ , и пр. В зависимости от преобладающего количества тех или иных соединений и их воздействия на свойства получающихся шлаков электродные покрытия для сварки сталей классифицируются как руднокислые (с преобладанием в шлаках окислов  $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ), рутиловые (со значительным содержанием  $\text{TiO}_2$ ), фтористокальциевые (содержащие в шлаках  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaF}_2$  и другие составляющие). В случае преобладающей защиты при сварке не шлаками, а значительным количеством органических составляющих, покрытия относятся к виду органических. Естественно, такая классификация является условной и возможны различные промежуточные покрытия и шлаки — кальцеворутитовые и др.

Применительно к сварке металлов с большим сродством к кислороду, например алюминия и его сплавов, применять покрытия из окислов нельзя, так как металл интенсивно окисляется, отбирая кислород от составляющих покрытия. В этих случаях покрытия, как правило, полностью состоят из хлоридов и фторидов ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{KF}$  и др.).

Следует всегда учитывать, что конечный состав шлака может значительно отличаться от исходного состава покрытия. Приведем для примера расчет состава шлака по составу покрытия при сварке электродами с покрытием типа УОНИ-13/45 при электродном стержне из проволоки Св-08А (см. приложение I).

Результаты расчетов по мере их получения будем заносить в табл. III.7.

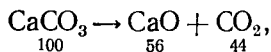
В графах 1 и 2 приведен состав покрытия по рецепту [24]. В связи с тем, что рецепт, рассчитанный на 100% по весу, дается обычно на сухую шихты, а сверх 100% прибавляется водный раствор силиката натрия (жидкого стекла), то для дальнейших рассуждений в 3-й графе приведен результат перерасчета всего покрытия с сухим остатком жидкого стекла на 100%. Цифры этой графы получаются делением цифр графы 2 на 1,12.

В графах 4 и 5 дана расшифровка наиболее обычного количества основных соединений и металлических элементов в составляющих электродного покрытия. Значения берутся из соответствующих ГОСТов (см. приложения). Так, например, шпат плавиковый электродный (ГОСТ 4421—48) должен иметь  $\text{CaF}_2 \geq 92\%$  (и обычно  $\text{SiO}_2 \leq 5\%$ ). Взято соответственно 95 и 5%. Ферросилиций марки СИ-75 (ГОСТ 1415—49) должен содержать  $\text{Si} = 72 \div 78\%$ . Взято 75%. В песке кварцевом электродном (ГОСТ 4417—48) должно находиться  $\text{SiO}_2 \geq 97\%$ . Взято 100%. Для расчета сухого остатка жидкого стекла взят обычный модуль 2,7.

Составляющие использования мрамора из покрытия, приведенные в графах 6—14, получаются следующим способом.

Количество  $\text{SiO}_2$  (пока считается, что двуокись кремния дает только шлаковую составляющую) в шлаке из мрамора в весовых частях примем как 5% от веса мрамора (48,3, графа 3), т. е.  $(\text{SiO}_2)_{ш} = 48,3 \cdot 0,05 = 2,4$  (записываем в графу 9).

При содержании в мраморе 93%  $\text{CaCO}_3$  содержание этого соединения в покрытии составляет  $48,3 \cdot 0,93 = 45,0$ . Это количество  $\text{CaCO}_3$  при сварке используется по реакции



т. е. дает:

$$(\text{CaO})_{ш} = 45 \frac{56}{100} = 25,3 \text{ (графа 7);}$$

$$(\text{CO}_2)_2 = 45 \frac{44}{100} = 19,7 \text{ (графа 14).}$$

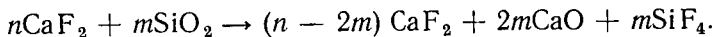
Сложнее произвести расчет с плавиковым шпатом. Из него 5% в виде  $\text{SiO}_2$  уходит в шлак

$$(\text{SiO}_2)_{ш} = 13,2 \cdot 0,05 = 0,6 \text{ (графа 9).}$$

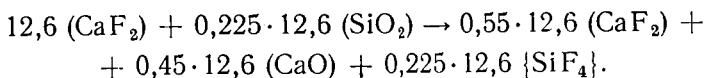
Т а б л и ц а III.7  
 Расчетный и полученный аналитически состав шлака при сварке электродами типа УОНИ-13/45

Составляющие электродного покрытия	Состав покрытия		Состав материа- лов по основ- ным соединениям				Перешло в ме- талл	Перешло в шлак						Перешло в газовую фазу
	По- ре- центу	Легирас- чет на 100% лет	Химиче- ская формула	Принято содержа- ние в %	CaO	CaF <sub>2</sub>		SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
													5	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Мрамор	54,0	48,3	CaCO <sub>3</sub> SiO <sub>2</sub>	93,0 5,0	—	25,3	—	2,4	—	—	—	—	CO <sub>2</sub> —19,7	
Глиняковый шпатель	15,0	13,2	CaF <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub>	95,0 5,0	—	4,1	6,9	0,6	—	—	—	—	SiF <sub>4</sub> —3,9	
Кварцевый пе- сок	9,0	8,0	SiO <sub>2</sub>	100,0	—	—	—	6,0	—	—	—	—	—	
Ферросилиций (Сн-75)	5,0	4,5	Si	75,0	0,9	—	—	5,5	—	—	—	—	—	
Ферромарганец (Мн-1)	5,0	4,5	Mn	80,0	1,9	—	—	—	—	—	2,2	—	—	
Ферроитан	12,0	10,7	Ti Si Al	22,0 3,0 5,0	—	—	—	0,7	3,9	—	—	1,0	—	
Жидкое стекло в виде водного рас- творя, пересиган- ное на сухой оста- ток	10—14 12	10,7	SiO <sub>2</sub> Na <sub>2</sub> O	73,0 27,0	—	—	—	8,0	—	2,7	—	—	—	
Итого	112	100	—	—	—	29,4	6,9	23,2	3,9	2,7	2,2	1,0	70,3	
						41,9	9,9	33,1	5,5	3,8	3,2	1,5	100	
						42,0	9,4	31,0	3,5	Не опре- делялось	4,0	Не опре- делялось		

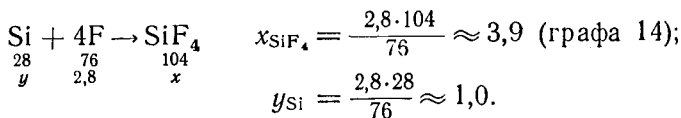
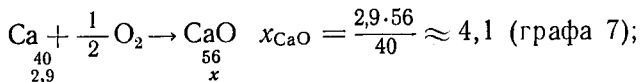
Количество  $\text{CaF}_2$  получаем из расчета  $13,2 \cdot 0,95 = 12,6$ . При сварке  $\text{CaF}_2$  реагирует с  $\text{SiO}_2$  по формуле



Значит, после этой реакции часть  $(n - 2m)$  остается в виде  $\text{CaF}_2$ , и появляется в шлаке  $2m\text{CaO}$  и в газовой фазе  $m\text{SiF}_4$ . Для расчета нам надо знать величину  $m$  в относительных величинах от  $n$ . Точные значения неизвестны. Накопленный автором опыт показывает, что в шлаковых системах с большим количеством  $\text{CaF}_2$  и малым  $\text{SiO}_2$  (например, в шлаках флюса типа 480Ф6) значение  $(n - 2m)$  обычно находится на уровне  $0,9 - 0,95n$ . В шлаках с относительно малым количеством  $\text{CaF}_2$  и большим количеством  $\text{SiO}_2$  величина  $(n - 2m) \approx 0,5$ . Для нашего случая можно брать это значение ближе к нижнему пределу, т. е.  $0,55 - 0,6$ . Возьмем  $n - 2m = 55n$ . Тогда  $m = 0,225n$ . Таким образом, для  $m = 1$



В результате имеем  $(\text{CaF}_2) = 6,9$  (графа 8). Количество  $\text{CaF}_2$ , распавшегося для образования  $\text{CaO}$  и  $\text{SiF}_4$ , получается равным  $12,6 - 6,9 = 5,7$ . Из этого количества доля кальция составляет  $5,7 \frac{40}{78} \approx 2,9$  (здесь 78 — молекулярный вес  $\text{CaF}_2$ :  $40 + 2 \cdot 19 = 78$ ), доля фтора —  $5,7 \frac{38}{78} \approx 2,8$ . В результате получаем:



$$y_{\text{Si}} = \frac{2,8 \cdot 28}{76} \approx 1,0.$$

По значению  $y_{\text{Si}} \approx 1,0$  находим расход  $\text{SiO}_2$  из шлака  $1 \cdot \frac{60}{28} \approx 2,0$  (60 — молекулярный вес  $\text{SiO}_2$ , 28 — кремния). Это количество  $\text{SiO}_2 = 2,0$  нужно вычесть из суммарного количества  $(\text{SiO}_2)_{\text{ш}}$  или из любой составляющей. Вычтем его из  $(\text{SiO}_2)_{\text{ш}}$ , получаемого из кварцевого песка.

Из кварцевого песка получаем  $8,0 (\text{SiO}_2)_{\text{ш}}$ . Но, вычитая  $2,0$  на образование  $\text{SiF}_4$ , заносим в графу 9 значение  $8,0 - 2,0 = 6,0$ .

Из ферросилиция, в котором содержится  $4,5 \cdot 0,75 = 3,48$  кремния, часть его пойдет на раскисление, а часть на легирование. Как было показано (см. § II.6), количество раскислителей в покрытии типа УОНИ-13 (кремний — из ферросилиция и ферротитана, титан и алюминий — из ферротитана и марганец — из ферромарганца) достаточно для связывания кислорода из  $\text{CO}_2$ , и при этом обеспечивается легирование наплавленного металла кремнием

примерно до 0,3% и марганцем до  $\sim 1\%$ , с  $K_{\text{перMn}} = 0,55 \div 0,6$ . Для расчета на легирование используем кремний из ферросилиция (т. е. считая кремний ферротитана идущим только на раскисление, так как это не меняет результатов расчета). По паспорту относительный вес покрытия УОНИ-13/45 равен 0,3—0,35; возьмем среднюю величину  $\frac{G_{\text{эл}}}{G_{\text{с}}} = 0,33$ . Тогда для получения 0,3% Si в наплавленном металле из покрытия должно расходоваться кремния

$$[\text{Si}]_{\text{эл}} = \frac{[\text{Si}]_{\text{нм}}}{\frac{G_{\text{эл}}}{G_{\text{с}}}} = \frac{0,3}{0,33} \approx 0,9 \text{ (графа 6).}$$

Остальное количество кремния из ферросилиция ( $3,48 - 0,9 = 2,58$ ) пойдет на раскисление с получением  $(\text{SiO}_2)_{\text{ш}}$

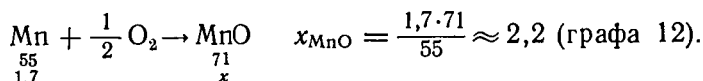
$$(\text{SiO}_2)_{\text{ш}} = \frac{2,58 \cdot 60}{28} \approx 5,5 \text{ (графа 9).}$$

Из ферромарганца часть марганца пойдет на легирование с коэффициентом перехода  $K_{\text{перMn}} = 0,55$ , а остальная часть даст  $(\text{MnO})_{\text{ш}}$ :

$$[\text{Mn}]_{\text{эл}} = 4,5 [\text{Mn}]_{\text{FeMn}} = 4,5 \cdot 0,8 = 3,6;$$

$$[\text{Mn}]_{\text{ш}} = 3,6 K_{\text{перMn}} = 3,6 \cdot 0,55 \approx 1,9 \text{ (графа 6).}$$

Остальное количество марганца ( $3,6 - 1,9 = 1,7$ ) пойдет на образование MnO:



Из ферротитана все учитываемые элементы (титан, кремний, алюминий) пойдут на соединение с кислородом. Титан в количестве  $10,7 \cdot 0,22 = 2,36$  дает  $\frac{2,36 \cdot 80}{48} = 3,9 \text{ TiO}_2$  (графа 10); кремний в количестве  $10,7 \cdot 0,03 = 0,32$  дает  $\sim 0,7 \text{ SiO}_2$  (графа 9) и алюминий в количестве  $10,7 \cdot 0,05 = 0,53$  дает  $\frac{0,53 \cdot 102}{54} \approx 1,0 \text{ Al}_2\text{O}_3$  (графа 13).

Жидкое стекло по модулю распределяется на  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Na}_2\text{O}$ , причем  $\text{SiO}_2 = \frac{10,7 \cdot 2,7}{2,7+1} \frac{60}{62}$  (т. е. на 1 молекулу  $\text{Na}_2\text{O}$  приходится 2,7 молекулы  $\text{SiO}_2$ ; 60 и 62 — соответственно молекулярные веса  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Na}_2\text{O}$ ), а  $\text{Na}_2\text{O} = \frac{10,7 \cdot 1}{2,7+1} \frac{62}{60}$ . Значения для  $\text{SiO}_2$ , равные 8,0, и  $\text{Na}_2\text{O} = 2,7$ , заносим в графы 9 и 11 таблицы.

Суммирование по весовым составляющим шлака приведено в строке «Итого». Общая их сумма составляет 70,3. В следующей строке состав шлака пересчитан в весовые проценты посредством умножения значений в весовых частях на  $\frac{100}{70,3}$ . В нижней строке приведен аналитически определенный состав шлака УОНИ-13/45.

Как показывает сопоставление, расчетный состав шлака очень хорошо совпадает с аналитическим. Наибольшее расхождение имеется только по  $TiO_2$ , т. е. как раз по тому соединению, которое в расчете сомнений не вызывает (хотя вообще возможно улетучивание титана в виде  $TiF_4$ , что могло бы сблизить расчетное количество  $TiO_2$  с экспериментальным). Однако возможны и ошибки в экспериментальном определении  $TiO_2$  в шлаках сложного состава.

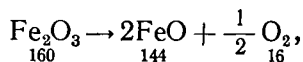
Следует отметить, что в расчете не учитывалось и некоторое окисление железа (из ферросплавов покрытия и стержня) и наличие сопутствующих примесей серы и фосфора в материалах, также дающих небольшое количество сернистых и фосфористых составляющих шлака. Обычно их суммарное количество, определяемое главным образом  $(FeO)_{ш}$ , при покрытиях типа УОНИ-13 не превышает  $\sim 2\%$ .

Оценивая шлак, получающийся при сварке электрода УОНИ-13/45, можно отметить, что в нем содержится значительное количество кислых окислов ( $SiO_2$  и  $TiO_2$ ) — суммарно  $\sim 35-38\%$ , при наличии основных окислов ( $\sum CaO, Na_2O, MnO, FeO$ )  $\sim 50\%$ .

Результаты аналогичного расчетного состава шлака при сварке электродами марки ЦМ-7 приведены в табл. III.8.

При этом дополнительного объяснения требует только расчет использования марганца, в основном на раскисление покрытия.

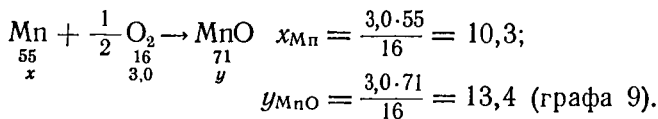
Покрытие ЦМ-7, имея в составе гематита  $\sim 95\%$   $Fe_2O_3$  и в граните  $\sim 5\%$   $Fe_2O_3$ , при нагреве выделяет кислород



т. е. 10% от весового количества  $Fe_2O_3$ .

Количество  $Fe_2O_3$  в гематите —  $29,5 \cdot 0,95 = 28,0$ ; количество  $Fe_2O_3$  в граните —  $28,6 \cdot 0,05 = 1,44$ . Соответственно 10% кислорода составляют 3,0, а  $FeO$  из гематита — 25,2 и из гранита — 1,3 (графа 7).

Кислород, выделенный из  $Fe_2O_3$ , окисляет марганец



Часть марганца идет на легирование наплавленного металла, причем  $[Mn]_{нм}$  обычно имеет значения 0,8—1,0%. Это требует его дополнительного легирования из покрытия  $\sim 0,5-0,55\%$ . Расход марганца на легирование

$$[Mn]_a = \frac{0,55}{G_{эп}} = \frac{0,55}{0,4} \approx 1,4 \text{ (графа 6).}$$

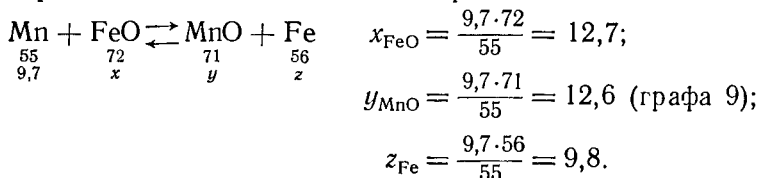


Состав шлака при сварке электродами марки ЦМ-7

Составляющие электродного покрытия	Состав покрытия		Состав материалов по основным соединениям		Пере- шло в ме- талл	Перешло в шлак					Перешло в газовую фазу
	По ре- цепту	Перерас- чет на 100%	Химическая формула	Принятое содержа- ние в %		FeO	SiO <sub>2</sub>	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O+ CaO	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Гематит	33,0	29,5	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SiO <sub>2</sub>	95,0 5,0	—	25,2	1,5	—	—	—	O <sub>2</sub> ≈2,8
Гранит	32,0	28,6	SiO <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Na <sub>2</sub> O+CaO	170,0 18,0 5,0 7,0	—	1,3	20,0	—	5,1	2,0	O <sub>2</sub> ≈0,14
Ферромарганец	30,0	26,7	Mn	80,0	1,4	-12,7	—	13,4 12,6	—	—	{Mn}
Крахмал	5,0	4,5	Cn (H <sub>2</sub> O) <sub>n-1</sub>	100,0	—	—	—	—	—	—	CO, H <sub>2</sub> 4,5
Жидкое стекло (сухой остаток)	12,0	10,7	SiO <sub>2</sub> Na <sub>2</sub> O	73,0 27,0	—	—	8,0	—	—	2,7	—
Итого	112,0	100,0	—	—	—	13,8	29,5	26,0	5,1	4,7 = ∑	79,1
						17,5	37,4	32,8	6,4	5,9	Не оп- ределен
						20,0	37,2	29,8		5,6	

Расчетный состав шлака, %  
Состав шлака по анализу, %

Из общего количества марганца в покрытии (80% от ферромарганца)  $26,7 \cdot 0,8 = 21,4$  г уже израсходовано 1,4 г на легирование и 10,3 г на связывание кислорода, освобождающегося по реакции  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 2\text{FeO} - \frac{1}{2}\text{O}_2$ . Остальное количество  $21,4 - (1,4 + 10,3) = 9,7$  будет частично теряться парами (при расчете не учитываем) и расходоваться на раскисление имеющихся окислов. Из окислов этой шлаковой системы FeO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, Na<sub>2</sub>O марганец будет раскислять в основном FeO по реакции



Полученное количество раскисленного FeO (12,7) должно быть вычтено из всего FeO, что условно в строке ферромарганца включено в графу 7 со знаком минус.

Итоговые значения с общей суммой 79,1 вес. ч. пересчитаны умножением на  $\frac{100}{79,1}$  в весовые проценты.

В последней строке дан химический состав шлака по анализам. Опять получено очень хорошее совпадение расчета с экспериментом, только расчетное значение (MnO)<sub>ш</sub> немного больше (не учтены потери парами), а поэтому (FeO)<sub>ш</sub> несколько меньше, чем получено при эксперименте (фактически FeO восстанавливалось меньшим количеством марганца и в шлаке его должно быть больше).

Следует отметить, что при сварке электродами марки ЦМ-7 железо, восстанавливаемое из FeO марганцем (по расчету в количестве 9,8 вес. ч.) поступает в наплавленный металл, повышая коэффициент наплавки.

Как правило, в покрытия вводят раскислители и легирующие добавки. Они обычно вводятся в шихту в виде порошкообразных металлических материалов — ферросплавов, богатых необходимыми элементами (ферромарганец, ферросилиций, ферротитан, феррохром и др.), или почти чистых металлов (алюминиевый порошок, марганец металлический и др.).

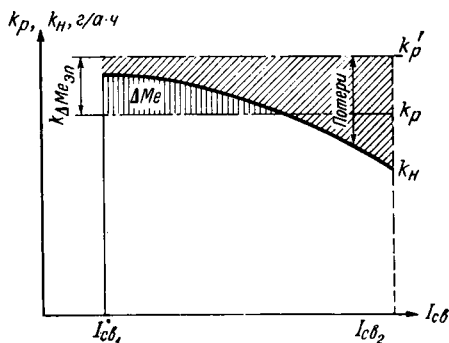
В последнее время для ряда электродов применяется добавка в покрытия порошкообразного железа с целью увеличения производительности сварки и улучшения технологических характеристик электродов.

Следует отметить, что некоторые металлические материалы, особенно раскислители, в конечном счете в значительной мере переходят в шлак (см., например, табл. III.7) и являются и шлакообразующими (примерно 20% шлака по весу, согласно табл. III.7, т. е. 13,3 из 70,3 вес. ч., составляют продукты окисления кремния

из ферросилиция и ферротитана, марганца из ферромарганца и титана и алюминия из ферротитана). Легирующие добавки, защищенные от выгорания и имеющие достаточно высокие значения  $K_{пер}$  (см. § II.6), а также железо из железного порошка, поступают в металл, увеличивая его количество по сравнению с тем, которое получилось бы от расплавления только стержня и соответственно изменяя химический состав наплавленного металла.

В качестве примера баланса металлических составляющих электрода (стержня и металлических добавок покрытия) рассмотрим рис. III.7.

Рис. III.7. Изменение значений коэффициента расплавления электродного стержня  $k_p$ , коэффициента наплавки  $k_H$  и коэффициентов расплавления металлических составляющих электрода  $k'_p$  в зависимости от силы сварочного тока  $I_{св}$ ; ( $I_{св1} - I_{св2}$ ) — диапазоны возможных значений силы тока для данного диаметра электрода



Зависимости, приведенные на этом рисунке, взяты из экспериментов с электродами марки УОНИ-13/45.

Известно, что электроды характеризуют с точки зрения производительности коэффициентами расплавления  $k_p$  и наплавки  $k_H$  в г/а·ч и потерями  $\varphi$  в %.

При этом коэффициент наплавки оценивается по приращению веса наплавленной пластины

$$k_H = \frac{(G_K - G_H)}{I_{св}t}, \quad (III.7)$$

где  $G_K$ ,  $G_H$  — вес наплавленной пластины после наложения валика и до сварки (наплавки) в г;

$I_{св}$  — сила сварочного тока в а;

$t$  — длительность горения дуги в ч,

а коэффициент расплавления по — весу израсходованного электродного стержня

$$k_p = \frac{(G_{эсК} - G_{эсН})}{I_{св}t}, \quad (III.8)$$

где  $G_{эсН}$ ,  $G_{эсК}$  — вес электродного стержня начальный (до сварки) и конечный (после сварки) в г.

При этом веса для электродов с покрытием рассчитываются по линейным размерам и плотности металла:

$$G_{эс} = \frac{\pi d_c^2}{4} L \gamma.$$

При сварке голым электродом  $k_p$  всегда больше  $k_n$  и потери в относительных величинах составляют

$$\varphi = \frac{k_p - k_n}{k_p} 100\%. \quad (\text{III.9})$$

Коэффициенты расплавления в пределах допустимого диапазона режимов сварки и по силе тока для конкретного диаметра электрода практически постоянны (прямая  $k_p$  на рис. III.7). Коэффициенты же наплавки с увеличением силы (плотности) тока, как правило, уменьшаются в связи с ростом потерь на разбрызгивание и угар (кривая  $k_n$ ). Однако при сварке электродами УОНИ-13/45 при малой силе тока оказывается, что  $k_n > k_p$  (площадь  $\Delta Me$ , заштрихованная вертикально). Это вызвано тем, что фактически в расплавляемом электроде металла больше, чем в электродном стержне.

Добавка металлической составляющей покрытия может быть определена по формуле

$$\Delta Me_{эн} = \frac{\sum P_{Me_{эн}}}{\sum P_{эн}} \frac{G_{эн}}{G_{эс}}, \quad (\text{III.10})$$

где  $\sum P_{Me_{эн}}$  — сумма весов всех металлических составляющих электродного покрытия;

$\sum P_{эн}$  — сумма весов всех материалов электродного покрытия.

Для электродов УОНИ-13/45 (см. табл. III.7, графу 3)  $\sum P_{Me_{эн}} = 4,5 + 4,5 + 10,7 = 19,7\%$  при  $P_{эн} = 100\%$ , т. е. примерно

$\frac{\sum P_{Me_{эн}}}{\sum P_{эн}} = 0,2$ . При относительном весе покрытия  $\frac{G_{эн}}{G_{эс}} = 0,33$

суммарное количество металла в электроде, по отношению к весу стержня, принятому за единицу, будет  $Me_{эс} + \Delta Me_{эн} = 1 + 0,2 \cdot 0,33 = 1,066$ , т. е. фактическое количество металла в израсходованном электроде на 6,6% больше, чем при расчете только на стержень. Поэтому фактический коэффициент расплавления надо представлять не в виде  $k_p$ , а в виде  $k'_p$ , который равен  $1,066k_p$  (прямая  $k'_p$ ).

Тогда во всем диапазоне режимов будут потери (область, заштрихованная косыми линиями, расположенная между линиями  $k_p$  и  $k_n$ ).

В настоящее время имеется много марок электродов, у которых  $\Delta Me_{эн}$  весьма значительна. Так, ряд марок электродов общего назначения, предназначенных для сварки конструкционных сталей, имеет в составе шихты покрытий до 60—70% железного порошка и некоторых ферросплавов при большом относительном весе покрытия  $\frac{G_{эн}}{G_{эс}} \approx 1,0 \div 1,2$ . В этом случае  $\Delta Me_{эн} = 1,0 \cdot 0,6 =$

$= 0,6$  или  $\Delta Me_{эп} = 1,2 \cdot 0,7 \approx 0,8$ , т. е. электрод может в 1,6—1,8 раза иметь металла больше, чем в электродном стержне.

Аналогично имеются и специальные, например наплавочные, электроды с большим  $\frac{G_{эп}}{G_{эс}}$  и большой массой металлических составляющих в покрытии. Так, электроды марки ЦИ-1М, для наплавки быстрорежущей стали типа Р18 имеют  $\frac{G_{эп}}{G_{эс}} \approx 1,4$  при относительно количестве металлических составляющих в покрытии  $\sim 80\%$ .

Естественно, что при необходимости расчета легирования наплавленного металла такая «добавка» к общему количеству металла должна учитываться и вводиться в расчет [см. § II.6, формула (II.57)] в виде дополнительного коэффициента [54]. В этих случаях формула преобразуется в вид

$$[Me]_{нм} = \frac{1}{A} \left\{ [Me]_{эс} K_{перMeэс} + \frac{G_{эп}}{G_{эс}} P_{Me} [Me]_{P_{Me}} K_{перMeэп} \right\}, \quad (III.11)$$

где  $A$  — коэффициент, учитывающий увеличение массы наплавленного металла по отношению к массе расплавленного стержня.

Для устойчивого горения дуги в покрытиях должны быть соединения, характеризующиеся малым потенциалом ионизации. К ним в первую очередь относятся  $K_2O$ ,  $Na_2O$ , в некоторой степени  $CaO$  и др. Такие соединения вносятся жидким стеклом, однако в ряде случаев рекомендуется и дополнительное их введение другими материалами покрытия (поташ, полевой шпат электродный, гранит — например в покрытии ЦМ-7). Хотя  $K_2O$  и  $Na_2O$  действуют неодинаково ( $K_2O$  более благоприятен как ионизатор), можно охарактеризовать необходимые количества суммы  $K_2O + Na_2O$  в покрытиях для сварки на постоянном токе около 3%, а для сварки на переменном токе, при обычных напряжениях сварочных трансформаторов  $\sim 65$  в, не менее 4—4,5%.

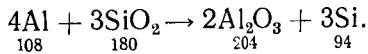
В качестве связующих в покрытиях обычно используются натриевые и калиевые жидкие стекла. В ряде случаев, особенно в практике зарубежных фирм, используются смеси калиевых и натриевых стекол.

В нашей стране стекло натриевое содовое класса А и силикат натрия растворимый (содовый) поставляются соответственно по ГОСТам 13078—67 и 13079—67.

Иногда для улучшения технологических свойств массы покрытия, главным образом при скоростном нанесении покрытий на электродных прессах (см. § III.5), в шихту вводятся специальные добавки, облегчающие формирование (бентонит и др.) или пластифицирующие покрытия (крахмал, альгинат натрия и др.). Их количество обычно не превышает 1% от веса шихты.

Как следует из табл. III.7 и III.8, и ионизаторы, и связующие, как правило, одновременно являются и шлакообразующими составляющими покрытий.

Однако не только состав покрытия определяет состав шлака и технологические характеристики электродов. Например, если в составе электродного стержня есть элементы с высокой степенью родства к кислороду, такие, как алюминий или титан, то они могут выгорать за счет взаимодействия с окислами покрытия. При аустенитном стержне, содержащем 5% Al (марганцевоалюминиевая сталь), даже наличие сухого остатка жидкого стекла дает заметное развитие реакции



Приняв типовое количество  $\text{SiO}_2$  в сухом остатке 8% от веса покрытия (см. табл. III.7, III.8) и относительный вес покрытия  $\frac{G_{\text{ан}}}{G_{\text{эс}}} \approx 0,4$  и считая, что если такая реакция Al и  $\text{SiO}_2$  пройдет до конца, то в наплавленном металле появится  $0,4 \cdot 0,08 \frac{84}{180} \approx 0,015$  или 1,5Si, а в шлаке вместо 8 вес. ч.  $\text{SiO}_2$  появится  $\frac{0,08}{0,8} \frac{204}{180} \approx 11,3\%$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  (где коэффициент 0,8 в знаменателе приближенно принят как переводной из весовых частей в проценты, который при покрытии УОНИ-13/45 равен 0,703, а при ЦМ-7 — 0,79). При этом из стержня выгорит  $1,5 \frac{108}{84} \approx 1,9\%$  Al. Такая замена ~2% Al кремнием (~1,5%) может недопустимо ухудшить свойства металла, а замена ~10%  $\text{SiO}_2$  в шлаке 11%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  может ухудшить шлак (резко изменить температуру плавления, вязкость и т. п.).

Подобный характер взаимодействия, правда в меньшей степени, может иметь место и при наличии сильных раскислителей в свариваемом металле. Так, при сварке марганцевоалюминиевой стали хромоникелевыми аустенитными электродами, содержащими в покрытии  $\text{SiO}_2$ , за счет выгорания Al в сварочной ванне шлак обогащается  $\text{Al}_2\text{O}_3$  примерно на 5%, что в ряде случаев приводит к его резкому ухудшению (например, к сильному «пригару» шлака к металлу за счет образования шпинелей; это весьма усложняет его удаление со швов).

Вообще в сложных шлаковых системах, получающихся при сварке в процессе остывания, образуются различные комплексные соединения. Например, в шлаках фтористокальциевых покрытий, в частности электродов типа УОНИ-13, образуется соединение, по составу отвечающее минералу куспидин с формулой  $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{CaF}_2$  при соотношении молярных весов 168 : 120 : 78. Если сосчитать возможное количество куспидина в шлаке, приведенном в табл. III.7, то получим, что его максимальное количество будет лимитироваться количеством  $\text{CaF}_2$ . Так, в шлаке  $\frac{9,9}{78} = 0,127$  моля  $\text{CaF}_2$ ; это количество может связать в куспидин

$2 \cdot 0,127 = 0,254$  моля  $\text{SiO}_2$  или  $\frac{x}{60} = 0,254$ , т. е. 15,3%  $\text{SiO}_2$  (в шлаке  $\text{SiO}_2$  более 30%). Соответственно  $\text{CaO}$  в куспидине будет  $3 \cdot 0,127 = 0,381$  моля, или  $\frac{y}{56} = 0,381$ , или  $y_{\text{CaO}} = 21,3\%$  (в шлаке  $\sim 42\%$   $\text{CaO}$ ). Тогда общее количество куспидина в шлаке может быть  $9,9 + 15,3 + 21,3 = 46,5\%$ .

Экспериментальные исследования П. П. Митриса показали, что при примерном одинаковом составе наплавленного металла увеличение куспидина в шлаке с  $\sim 20$  до  $\sim 50\%$  повышает ударную вязкость металла, что может быть объяснено большим очищением металла от неметаллических примесей. Дальнейшее увеличение куспидина в шлаке до  $\sim 70\%$  ударную вязкость малоуглеродистых швов не увеличивает.

Отдельные опыты показывают благоприятную характеристику сварочных шлаков при наличии в них значительных количеств монтичеллита ( $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ ).

В связи с большим разнообразием сварочных плавящихся электродов во всех передовых в техническом отношении странах для этих электродов разрабатываются классификационные признаки и общие требования.

В СССР имеется несколько ГОСТов на стальные электроды для сварки.

Общие технические требования, регламентация размеров, требования к внешнему виду, допуски на эксцентricность покрытия (не центральное расположение стержня в электроде), на механическую прочность и влагостойкость покрытия, правила приемки и методы испытания электродов, а также требования к содержанию паспорта электродов (документа, характеризующего технические характеристики конкретной марки электродов) сформулированы в ГОСТе 9466—60.

Стальные электроды для сварки углеродистых и легированных конструкционных и теплостойких сталей должны отвечать требованиям не только ГОСТа 9466—60, но и ГОСТа 9467—60. Требования ГОСТа 9467—60 по группам типов электродов для углеродистых и легированных конструкционных сталей (см. приложение III) классифицируются по обеспечиваемым электродам механическим свойствам наплавленного металла (или только для электродов диаметром  $d \leq 2,5$  мм — по механическим свойствам сварных соединений) и допустимым пределам содержания серы и фосфора в наплавленном металле.

Классификация типов электродов для сварки легированных теплостойких сталей (см. приложение IV) кроме механических свойств, определяемых при нормальной температуре после предусмотренной паспортом термической обработки, формулирует требования к химическому составу наплавленного металла как по основным легирующим элементам (C, Si, Mn, Cr, Mo, V, Nb), так и по вредным примесям (S, P).

Также ГОСТом 9467—60 устанавливаются четыре вида составов покрытий:

Вид покрытия	Условное обозначение
Руднокислое . . . . .	Р
Рутильное . . . . .	Т
Фтористокальциевое . . . . .	Ф
Органическое . . . . .	О

Конкретные марки электродов должны отвечать тому или иному типу электродов по ГОСТу. При этом каждому типу может соответствовать ряд различных марок электродов. Условное обозначение электродов должно включать наименование марки, типа электродов, диаметр и вид состава покрытия. Например, для электродов УОНИ-13/45 типа Э-42А диаметром 5 мм с фтористокальциевым покрытием обозначение должно быть таким: УОНИ-13/45 Э-42А 5Ф, ГОСТ 9467—60.

Электроды для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами должны удовлетворять требованиям ГОСТа 10052—62, предусматривающего 22 типа электродов, дающих хромоникелевый аустенитный, и пять типов — хромистый ферритный (феррито-мартенситный) наплавленный металл (см. приложение V). В этом случае для каждого типа электрода регламентируются химический состав наплавленного металла, механические свойства при нормальной температуре, а также для ряда типов пределы содержания ферритной фазы в структуре и стойкость против межкристаллитной коррозии.

Требования к электродам для дуговой наплавки слоев с особыми свойствами сведены в ГОСТ 10051—62. В этом случае классификационными признаками типа электродов являются пределы содержания легирующих элементов в наплавленном металле и твердость после рекомендованной паспортом термической обработки (см. приложение VI).

Кроме того, для каждого типа приводятся примерные марки электродов.

Более подробные сведения о применяемых марках электродов имеются в различных справочниках [24], марочниках и каталогах [76].

### § III.4. Применимость оценочных расчетов при разработке электродных покрытий

Наиболее обычным способом разработки электродов является экспериментальный подбор покрытия при выбранном составе электродного стержня. В зависимости от технических требований к электроду такой экспериментальный подбор требует большего или меньшего количества проверяемых вариантов. Однако, как правило, число вариантов достигает нескольких десятков, а в ряде случаев проверяется более сотни различных композиций. Есте-



ственно, что это длительный и часто весьма дорогостоящий эксперимент.

Можно предположить, что используя накопленный при разработке сварочных электродов опыт, а также применяя некоторые расчеты, позволяющие выделить наиболее вероятные области составов, заслуживающих проверки при создании новых покрытий, число требуемых экспериментов для решения такой задачи будет сокращаться.

В таких расчетах, как было показано выше, могут быть оценены необходимые количества раскислителей, легирующих добавок, композиции шлаков и шлакообразующих составляющих покрытий, материалы, обеспечивающие требуемую устойчивость дуги, и пр.

Некоторые исходные величины к таким расчетам (оценка количества связующих, формирующих добавок, желаемой концентрации элементов в наплавленном металле и др.) могут приниматься по общим соображениям или на основании сопоставления с уже имеющимися материалами.

Рассмотрим в качестве примера систему таких оценочных расчетов для разработки электродов, отвечающих следующим техническим требованиям.

1. Электрод предназначен для сварки углеродистых и низколегированных сталей на постоянном и переменном токе при любом пространственном расположении швов и должен обеспечивать свойства наплавленного металла, отвечающего типу Э-50А по ГОСТу 9467—60.

2. В связи с необходимостью выполнения сварки в замкнутых (полузамкнутых) конструкциях ограниченного объема должно быть исключено выделение фтористых газов ( $\text{CaF}_2$  практически использоваться не должен).

3. Применение в покрытиях ферротитана и  $\text{TiO}_2$  исключается (по конъюнктурным соображениям\*).

Принимаем в качестве основы следующее.

а) Так как разрабатываемый электрод имеет общее назначение, целесообразно в качестве стержней применять проволоку марки Св-08А по ГОСТу 2246—60.

б) Из опыта имеющихся электродов типа Э-50А (например, электродов УОНИ-13/55) известно, что механические свойства наплавленного металла могут быть обеспечены при следующем его химическом составе:  $\text{C} \approx 0,1\%$ ;  $\text{Si} = 0,3—0,35\%$ ;  $\text{Mn} \approx 1\%$ ;  $\text{S} \leq 0,04\%$ ;  $\text{P} \leq 0,04\%$ , и при ограничениях по азоту, кислороду и водороду. При выбранном составе электродного стержня легирование наплавленного металла кремнием и марганцем должно производиться через покрытие.

в) Руднокислые покрытия электродов не обеспечивают свойств металла, отвечающих требованиям, предъявляемым к типу Э-50А.

---

\* Такой период имел место

Органическое покрытие и введение органических составляющих в покрытия электродов, предназначенных для сварки низколегированных сталей, исключено вследствие введения в шов при сварке такими электродами водорода, способствующего образованию трещин в сварных соединениях. Для низколегированных сталей сильноокислые шлаки не рекомендуются, хотя бы в связи с трудностями обеспечения заданного уровня содержания в наплавленном металле серы и фосфора. Из этого следует, что газовая защита должна обеспечиваться диссоциацией карбонатов ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ), а в шлаке должны присутствовать в значительной степени основные окислы (в частности,  $\text{CaO}$ ).

г) Для обеспечения возможности сварки в любом пространственном расположении относительный вес покрытия должен ограничиваться, по сопоставлению с УОНИ-13/55, величиной 0,3—0,35.

На основании изложенного выберем шлаковую систему. Применение шлака, содержащего  $\text{TiO}_2$ , ограничено по техническому заданию (п.3). Шлаки системы  $\text{SiO}_2\text{—MnO—FeO}$  отвергаются по соображениям пункта в. По окислительной способности сгранициваются все шлаки, богатые  $\text{FeO}$ . В шлаках обязательно будет заметное количество  $\text{SiO}_2$  (сухой остаток жидкого стекла; легирование и раскисление кремнием и пр.). Однако количество  $\text{SiO}_2$  в шлаке не должно быть более 50%, иначе он будет кислым. Шлак не должен содержать  $\text{CaF}_2$ , а  $\text{CaO}$  (для обезфосфоривания и десульфурации) должен присутствовать в нем в заметных количествах.

Двойная система  $\text{SiO}_2\text{—CaO}$  не годится, так как минимальная температура плавления таких шлаков  $\sim 1450^\circ\text{C}$  (рис. III.8) слишком высока для сварочных шлаков (см. § II.5).

Рассмотрим тройные системы:  $\text{SiO}_2\text{—CaO—MnO}$ ,  $\text{SiO}_2\text{—CaO—Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2\text{—CaO—MgO}$ .

Диаграммы для этих систем приведены на рис. III.9.

Как следует из рассмотрения диаграмм, у этих тройных шлаковых систем имеются области составов с  $T_{\text{пл}} \approx 1300^\circ\text{C}$ , т. е. с температурой, которая может удовлетворить требованиям к сварочным шлакам при сварке сталей.

В системе  $\text{SiO}_2\text{—CaO—MnO}$  эта область лежит при составах  $\sim 40\%$   $\text{SiO}_2$ ,  $40\%$   $\text{MnO}$  и  $20\%$   $\text{CaO}$ . Такое значительное количество  $\text{MnO}$  может при раскислении кремнием привести к марганцевосстановительному процессу и, кроме того, к токсичности пылевыведения при сварке.

В системе  $\text{SiO}_2\text{—CaO—Al}_2\text{O}_3$  температура плавления  $1300^\circ\text{C}$  имеет место при составах  $\sim 50\%$   $\text{SiO}_2$ ,  $\sim 30\%$   $\text{CaO}$  и  $\sim 20\%$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  и является очень ограниченной.

В системе  $\text{SiO}_2\text{—CaO—MgO}$  область таких температур плавления шире и находится по составам шлаков близкой к  $\sim 50\%$   $\text{SiO}_2$ ,  $30\%$   $\text{CaO}$  и  $20\%$   $\text{MgO}$  (зона со звездочкой на рис. III.9, в). Выше (см. § III.3) было отмечено, что соединение монтичеллит

(CaO·MgO·SiO<sub>2</sub>) дает достаточно удовлетворительные характеристики сварочным шлакам.

Приняв эту систему шлака в качестве карбонатов, вводимых в покрытие, следует использовать CaCO<sub>3</sub> и MgCO<sub>3</sub>.

Схема расчета покрытия состоит из ряда отдельных этапов. Сперва рассчитывается легирование марганцем при тех же коэффициентах перехода, как и для УОНИ-13. Затем рассчитывается раскисление кремнием и его легирование (принимая сперва ко-

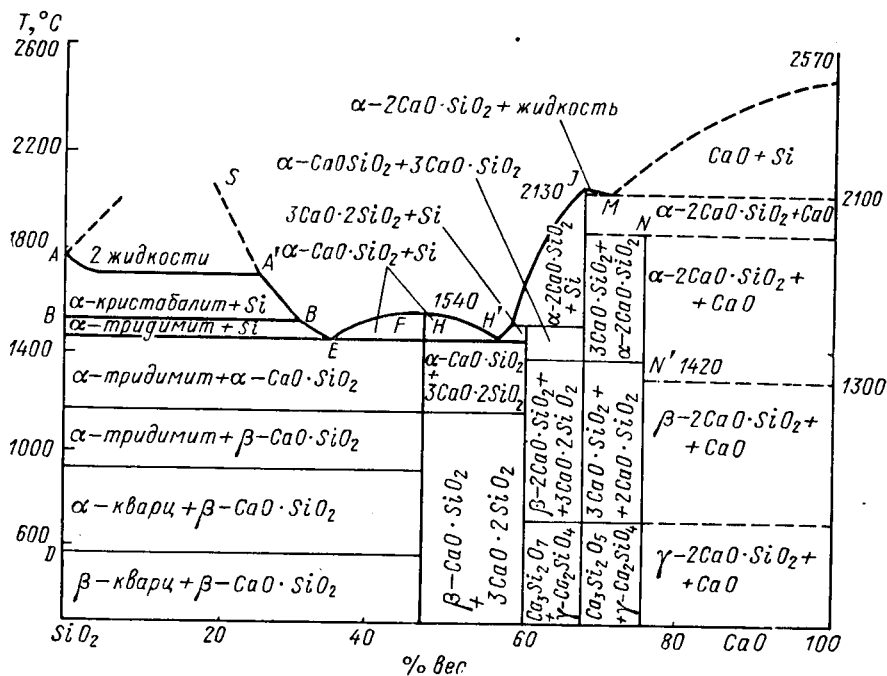
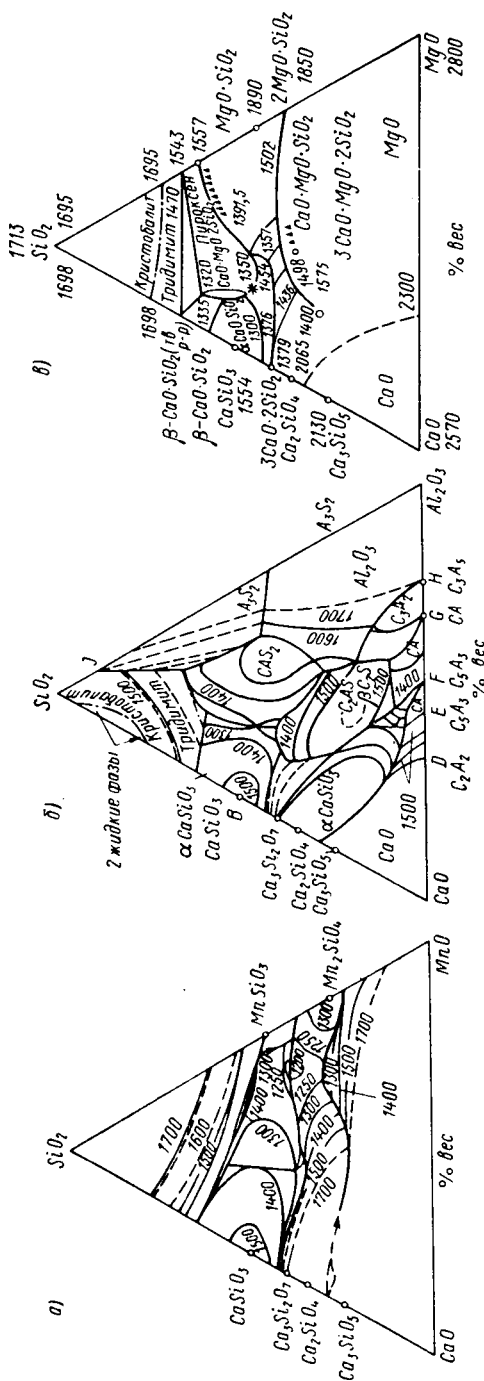


Рис. III.8. Диаграмма состояния системы CaO—SiO<sub>2</sub>

личества для раскисления подобно покрытию УОНИ-13, рассмотренному ранее). После этого набираются в весовых частях все составляющие покрытия, несущие с собой SiO<sub>2</sub> (жидкое стекло, формирующие добавки, если надо — материалы, улучшающие ионизацию дугового промежутка). По суммарному количеству весовых частей SiO<sub>2</sub> как <sup>3</sup>/<sub>5</sub> подсчитывается CaO, а по нему — CaCO<sub>3</sub>. Затем как <sup>2</sup>/<sub>5</sub> от SiO<sub>2</sub> находится MgO и соответственно — MgCO<sub>3</sub>. После этого подбираются материалы, вносящие в покрытие CaCO<sub>3</sub> и MgCO<sub>3</sub> и, если они содержат дополнительные количества SiO<sub>2</sub> как сопутствующей им примеси, то осуществляется перерасчет CaO и MgO.

По мере выполнения расчета будем заполнять табл. III.9.



Для получения  $[Mn]_{нм} \approx 1-1,1\%$ , при его содержании в стержне марки Св-08А около 0,4%, долегирование за счет покрытия должно составлять  $\sim 0,65-0,70\%$ :

$$\Delta [Mn]_{нм,эп} = 0,70; K_{пер,Me,эп} \approx 0,6;$$

$$[Mn]_{эп} = \frac{\Delta [Mn]_{нм,эп}}{K_{пер,Me,эп}} \cdot \frac{1}{\frac{G_{эп}}{G_{эс}}} = \frac{0,70}{0,6 \cdot 0,3} = 3,9\%$$

Пересчитывает на ферромарганец Mn-1

$$\frac{[Mn]_{эп}}{[Mn]_{FeMn}} = \frac{3,9}{0,8} = 4,9 \text{ (записываем в графу 2).}$$

Из 3,9% Mn электродного покрытия в металл переходит  $3,9 \cdot 0,6 = 2,34$  (графа 5), а  $3,9 - 2,34 = 1,56$  окисляется и остается в шлаке в виде MnO. Количество MnO будет  $\frac{1,56 \cdot 71}{55} \approx 2,0$  (графа 11).

Как было показано ранее,  $Si_{эп}$  будет расходоваться на раскисление в количествах примерно 1,5-1,7% от веса стержня и на легирование наплавленного металла до  $[Si]_{нм} = 0,3-0,35\%$ . Тогда общее количество необходимого кремния в электроде

$$[Si]_э = [Si]_р + [Si]_л \approx 1,6 + \frac{0,35}{K_{пер,Si,эп}} = 1,6 + \frac{0,35}{0,8} = 1,6 + 0,44 = 2,04\%$$

Рис. III.9. Диаграммы состояния тройных систем: а — MnO—CaO—SiO<sub>2</sub>; б — MnO—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—SiO<sub>2</sub>; в — CaO—MgO—SiO<sub>2</sub>

Расчет состава покрытия по заданной системе шлака

№ пп.	Составляющие электроодного покрытия	Состав покрытия с учетом сухого остатка жидкого стекла	Состав материалов по основным соединениям	Перешло в шлак					Перешло в газовую фазу				
				Перешло в металл									
				Химическая формула	Содержание в %	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO		Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	Ферромарганец Mn-1	4,9	Mn	80,0	2,34	—	—	—	—	—	—	—	—
2	Ферросилиций Si-75	9,1	Si	75,0	1,17	12,1	—	—	—	—	—	—	—
3	Жидкое стекло (сухой остаток)	11,0	SiO <sub>2</sub> Na <sub>2</sub> O	73,0 27,0	—	8,0	—	—	3,0	—	—	—	—
4	Полевой шпат	7,0	SiO <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	70,0 20,0 10,0	—	4,9	—	—	0,7	1,4	—	—	—
5	Бентонит	1,0	SiO <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	70,0 30,0	—	0,7	—	—	—	0,3	—	—	—
6	CaCO <sub>3</sub> (чистый)	23,6	CaCO <sub>3</sub>	100,0	—	—	15,4	—	—	—	—	—	CO <sub>2</sub> =12,0
7	MgCO <sub>3</sub> (чистый)	23,6	MgCO <sub>3</sub>	100,0	—	—	—	10,3	—	—	—	—	CO <sub>2</sub> =12,3
Итого						25,7	15,4	10,3	3,7	1,7	2,0	—	—

Так как в проволоке содержание  $\text{Si} \leq 0,03\%$ , то все количество кремния должно вводиться через покрытие. При  $\frac{G_{\text{эп}}}{G_{\text{эс}}} = 0,3$  получаем

$$[\text{Si}]_{\text{эп}} = \frac{[\text{Si}]}{\frac{G_{\text{эп}}}{G_{\text{эс}}}} = \frac{2,04}{0,3} = 6,8\%.$$

Производим перерасчет на ферросилиций  $\text{Si}-75$

$$\frac{[\text{Si}]_{\text{эп}}}{[\text{Si}]_{\text{FeSi}}} = \frac{6,8}{0,75} = 9,1\% \text{ (графа 2).}$$

Из  $6,8\%$   $\text{Si}$  в наплавленный металл переходит  $\frac{0,3\text{б}}{\frac{G_{\text{эп}}}{G_{\text{эс}}}} = \frac{0,35}{0,3} = 1,17$  (графа 5). Окисляется и переходит в шлак  $6,8 - 1,17 = 5,63\%$ , что соответственно даст  $\frac{5,63 \cdot 60}{28} = 12,1 \text{ SiO}_2$  (графа 6).

Сухой остаток жидкого стекла сверх  $100\%$  шихты составляет обычно  $10-14\%$  (примем при расчете  $12\%$ ). Как было рассчитано ранее (см. табл. III.7, III.8), это в пересчете с учетом и шихты и сухого остатка стекла на  $100\%$  составляет  $10,7\%$ . Примем  $11\%$  (графа 2). При модуле  $2,7$  это дает  $11 \cdot 0,73 \approx 8,0 \text{ SiO}_2$  (графа 6) и  $11 \cdot 0,27 \approx 3,0 \text{ Na}_2\text{O}$  (графа 9).

Такого количества  $\text{Na}_2\text{O}$  (даже с учетом возможного увеличения этого соединения при дальнейшем пересчете весовых частей к  $100\%$ ) для электродов, предназначенных для сварки на переменном токе, недостаточно. Необходимо увеличить количество ионизаторов ( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ ). Из обычных материалов электродных покрытий, кроме поташа, который вызывает гигроскопичность покрытия, наиболее богатым такими соединениями является шпат полевой электродный  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} \geq 10\%$  (см. приложение IX, п. 2). Для того чтобы сумма  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  была бы больше  $4\%$ , в шихту покрытия необходимо добавить  $0,7-0,9$  вес. ч. этих соединений за счет полевого шпата. Тогда полевого шпата будет примерно в  $10$  раз больше, т. е.  $\sim 7,0$  (графа 2). Приняв состав полевого шпата (ГОСТ 4422—48)  $\text{SiO}_2 \approx 70\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \approx 20\%$  и  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 10\%$ , при  $7$  вес. ч. (графа 4) полевого шпата получим соответственно  $0,7 \text{ K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  (графа 10);  $4,9 \text{ SiO}_2$  (графа 7) и  $1,4 \text{ Al}_2\text{O}_3$  (графа 10).

Считаем целесообразным сразу предусмотреть в составе покрытия и формирующие добавки, причем в качестве таковой примем бентонит в количестве  $1,0\%$  (графа 2). Это даст  $0,7 \text{ SiO}_2$  (графа 6) и  $0,3 \text{ Al}_2\text{O}_3$  (графа 10).

Теперь подсчитаем сумму по  $\text{SiO}_2$ :  $12,1 + 8,0 + 4,9 + 0,7 = 25,7$ . Это для принятого состава шлака в системе  $\text{SiO}_2-\text{CaO}-\text{MgO}$  должно составлять  $\sim 50\%$ .

Сопоставление рассчитанного и отработанного экспериментом составов покрытий

№ по табл.	2	3	Перешло в шлак						10	11	12
			Состав покрытия с учетом сухого остатка жидкого стекла								
1	Составляющие электродного покрытия	Состав покрытия с учетом сухого остатка жидкого стекла	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO+FeO	Перешло в газовую фазу	Расчет расчетной шихты покрытия в %	Расчет по-крайней, уточненный экспериментами, в %
			4	5	6	7	8	9			
6,7	Доломит	62,0 *	3,7	17,7	12,2	—	—	—	CO <sub>2</sub> =28,4	74,0	70,0
4	Полевой шпат	7,0	4,9	—	—	0,7	1,4	—	—	8,3	9,0
2	Ферросилиций Si-75	9,1	12,1	—	—	—	—	—	—	10,8	10,0
1	Ферромарганец Мп-1	4,9	—	—	—	—	—	2,0	—	5,8	5,0
5	Бентонит	1,0	0,7	—	—	—	0,3	—	—	1,1	1,0
—	Боксит **	—	(1,6)	—	—	—	—	(3,4)	2	—	5,0
3	Жидкое стекло	11,0	8,0	—	—	3,0	—	—	—	—	—

\* Перерасчет на доломит вместо чистых CaCO<sub>3</sub> и MgCO<sub>3</sub> (при содержании в нем 6% SiO<sub>2</sub>).

\*\* Боксит введен после экспериментов. Его составляющие в шлаке в связи с этим введены в скобках как не учитываемые расчетом.

Если для получения CaO и MgO принять химически чистые CaCO<sub>3</sub> и MgCO<sub>3</sub>, то их количества могут быть рассчитаны из соотношений:

$$(CaO)_{ш} = \frac{3}{5} (SiO_2)_{ш} \text{ или } (CaO)_{ш} = 0,6 \cdot 25,7 = 15,4 \text{ (графа 7);}$$

$$(MgO)_{ш} = \frac{2}{5} (SiO_2)_{ш} \text{ или } (MgO)_{ш} = 0,4 \cdot 25,7 = 10,3 \text{ (графа 8).}$$

Соответственно в пересчете на CaCO<sub>3</sub> и MgCO<sub>3</sub> получим:

$$\begin{array}{ccc} CaCO_3 & \rightleftharpoons & CaO + CO_2 \\ \frac{100}{x} & & \frac{56}{15,4} \quad \frac{44}{y} \end{array} \quad x_{CaCO_3} = \frac{15,4 \cdot 100}{56} = 27,4 \text{ (графа 2);}$$

$$y_{CO_2} = \frac{15,4 \cdot 11}{56} = 12,0 \text{ (графа 12);}$$

$$\begin{array}{ccc} MgCO_3 & \rightleftharpoons & MgO + CO_2 \\ \frac{81}{x} & & \frac{37}{10,3} \quad \frac{44}{y} \end{array} \quad x_{MgCO_3} = \frac{10,3 \cdot 81}{37} = 23,6 \text{ (графа 2);}$$

$$y_{CO_2} = \frac{10,3 \cdot 44}{37} = 12,3 \text{ (графа 12).}$$

Однако химически чистые CaCO<sub>3</sub> и MgCO<sub>3</sub> применять в электродных покрытиях нецелесообразно. Можно принять мрамор электродный (ГОСТ 4416—48) и магнезит. Это будет вносить примеси, например с мрамором придет ~3% SiO<sub>2</sub>. Тогда количество мрамора в сравнении с чистым CaCO<sub>3</sub> надо будет увеличить до

#### Плотность электрод

Марка электрода	Марка проволоки	Плотность проволоки в г/см <sup>3</sup>	Состав сухой								
			Мрамор	Плавленый шпат	Кварцевый песок	Марганцевая руда	Ильменит	Гематит	Полевой шпат	Гранит	TiO <sub>2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
УОНИ-13/15	Св-08А	7,86	54	15	9	—	—	—	—	—	—
ЦМ-7	Св-08А	7,86	—	—	—	—	—	33	—	32	—
ОММ-5	Св-08А	7,86	—	—	—	21	37	—	13	—	—
ЦТ-15	X18H11Б	7,9	33	45	—	—	—	—	—	—	5
КТИ-5	ЭИ-400	7,97	26	40	—	—	—	—	—	—	—
КТИ-9	ЭИ-797	7,75	38	47	—	—	—	—	—	—	4,5
ЗА-464/5	ЭИ-464	7,85	35	28	—	—	—	—	—	—	—
КЗ	1Х13	7,75	27	47	—	—	—	—	—	—	3



$$\frac{27,4}{0,92} + \frac{3}{5} \frac{100}{56} 0,03 \frac{27,4}{0,92} = 29,7 + 1,1 = 30,8.$$

Аналогично можно подсчитать поправку на магнезит.

Однако наиболее целесообразно использовать для получения  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{MgCO}_3$  один материал — доломит, содержащий ~50%  $\text{CaCO}_3$ , ~44%  $\text{MgCO}_3$  и ~6%  $\text{SiO}_2$ .

С учетом пересчета на доломит в табл. III.10 приведен окончательно рассчитанный состав покрытия, а также рецепт сухой шихты, принимаемый за 100%, как это принято в электродном производстве.

Расчитанное покрытие подвергалось экспериментальной проверке, в результате чего было установлено, что шлак при сварке несколько тугоплавок (что и можно было предположить по анализу температуры плавления в системе  $\text{SiO}_2\text{—CaO—MgO}$ ) и поэтому пришлось добавить в качестве разжижителя железистый боксит. Подобранный при экспериментах состав также приведен в графе 12 табл. III.10.

Как следует из сопоставления расчетного покрытия и полученного опытным путем это уточнение экспериментом оказалось небольшим, что указывает на возможность выбора композиции покрытия расчетом, сокращающим экспериментальные исследования.

Как показывают все расчеты по электродам, в них всегда участвует относительный вес покрытия  $\frac{G_{эл}}{G_{эс}}$ . Однако технологи-

Таблица III.11

ных покрытий

шихты в %											Жидкое стекло сверх шихты	Плотность покрытия в $\text{г/см}^3$	
Ферросили- ций	Ферромарга- нец	Феррони- обий	Феррова- надий	Ферромо- либден	Ферротитан	Mn	Cr	Ni	Al	Крахмал		расчетная	эксперимен- тальная
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
5	5	—	—	—	12	—	—	—	—	—	~30%	1,97	2,00
—	30	—	—	—	—	—	—	—	—	5	~30%	2,64	2,72
—	20	—	—	—	—	—	—	—	—	9	~30%	2,53	2,50
—	3,5	10	—	—	3	—	9,5	—	—	—	~30%	2,19	2,20
—	15	—	4	—	—	—	15	—	—	—	~30%	1,98	1,98
2	2	—	—	—	—	—	—	1,5	5	—	~30%	2,68	2,61
—	—	—	—	14	15	8	—	—	—	—	~30%	2,81	2,72
3	3	—	—	—	—	—	17	—	—	—	~30%	2,45	2,36

ческой характеристикой для производства электродов является толщина покрытия на сторону ( $\delta$  на рис. III.6). Естественно, что между этими показателями существует непосредственная связь. Вес стержня на длине  $L$  равен

$$G_{эс} = \frac{\pi d^2}{4} L \gamma_{эс}. \quad (\text{III.12})$$

Соответственно вес покрытия на этой длине

$$G_{эн} = \frac{\pi}{2} (D^2 - d^2) L \gamma_{эн}, \quad (\text{III.13})$$

где  $\gamma_{эс}$  и  $\gamma_{эн}$  — плотность электродного стержня и покрытия в  $г/см^3$ .

Если значения  $\gamma_{эс}$  для большинства электродных стержней обычно могут быть легко найдены (для соответствующих металлов и сплавов), то значения  $\gamma_{эн}$  обычно неизвестны. Однако величину  $\gamma_{эн}$  можно приближенно подсчитать по составу покрытия [52]

$$\gamma_{эн} = k (A \gamma_A + B \gamma_B + B \gamma_B + \dots + M \gamma_M), \quad (\text{III.14})$$

где  $A, B, B, \dots, M$  — долевое участие различных материалов в покрытии (включая и сухой остаток жидкого стекла);

$\gamma_A, \gamma_B, \gamma_B, \dots, \gamma_M$  — плотности монолитных материалов  $A, B, B, \dots, M$ ;

$k$  — коэффициент, установленный по соотношению плотности соответствующих материалов и насыпного веса хорошо уплотненных порошков дисперсности, применяемой в шихте электродных покрытий; экспериментально проверенный на многих покрытиях  $k = 0,56 \div 0,6$  (обычно принимается  $k = 0,59$ ).

Плотности ряда материалов, применяющихся в электродных покрытиях, приведены в приложении VII.

Подсчитаем для примера плотность покрытия УОНИ-13/45, взяв состав покрытия из табл. III.7, графа 3,

$$\begin{aligned} \gamma_{уони} &= 0,59 (0,483 \cdot 2,7 + 0,132 \cdot 3,18 + 0,08 \cdot 2,7 + \\ &+ 0,045 \cdot 3,45 + 0,045 \cdot 6,70 + 0,107 \cdot 6,4 + 0,107 \cdot 2,4) = \\ &= 1,97 \text{ г/см}^3. \end{aligned}$$

Экспериментальные определения [26] показали разброс значений  $\gamma_{уони}$  в пределах 1,95—2,05 со средней величиной  $\sim 2,00 \text{ г/см}^3$ . Сопоставление расчетных и экспериментальных значений для некоторых марок электродов приведено в табл. III.11.

Как следует из сопоставления граф 25 и 26 табл. III.11, расчетное значение плотностей редко отличается более чем на 3% от среднего экспериментального, хотя при этом проверялись

электроды как с нанесением покрытия опрессовкой, так и окутанием.

Следовательно, зная состав покрытия, можно рассчитать его плотность достаточно точно. А тогда по пределам отношения  $\frac{G_{эн}}{G_{эс}}$  можно определить и допуски на толщину покрытия. Развивая формулы (III.12) и (III.13), получим при  $D = d + 2\delta$ :

$$\frac{G_{эн}}{G_{эс}} = \frac{\frac{\pi}{2} (D^2 - d^2) L \gamma_{эн}}{\frac{\pi}{4} d^2 L \gamma_{эс}} = \frac{D^2 - d^2}{d^2} \frac{\gamma_{эн}}{\gamma_{эс}}; \quad (III.15)$$

$$D = d \sqrt{1 + \frac{G_{эн}}{G_{эс}} \frac{\gamma_{эс}}{\gamma_{эн}}}; \quad (III.16)$$

$$\delta = \frac{d}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{G_{эн}}{G_{эс}} \frac{\gamma_{эс}}{\gamma_{эн}}} - 1 \right). \quad (III.17)$$

Интересно отметить, что расчеты по формулам (III.16) и (III.17) позволяют установить допуск по толщине покрытия при оговоренных пределах  $\frac{G_{эн}}{G_{эс}}$ .

Так, в табл. III.12 приведены расчетные значения толщины покрытия  $\delta$  для некоторых распространенных марок электродов общего назначения в сопоставлении с толщинами регламентированными паспортами этих электродов.

Как следует из сопоставления граф 3 и 4, 6 и 7, 9 и 10, предусмотренные паспортами электродов относительные веса покрытий не обеспечиваются указанными в тех же паспортах толщинами покрытий.

Таблица III.12

Расчетные и паспортные значения толщины покрытий при оговоренных пределах относительного веса покрытия

Диаметр электродного стержня в мм	УОНИ-13/45		ЦМ-7		ОММ-5	
	Относитель- ный вес $\frac{G_{эн}}{G_{эс}}$	Пределы толщины $\delta$ в мм по паспорту   по расчету	Относитель- ный вес $\frac{G_{эн}}{G_{эс}}$	Пределы толщины $\delta$ в мм по паспорту   по расчету	Относитель- ный вес $\frac{G_{эн}}{G_{эс}}$	Пределы толщины $\delta$ в мм по паспорту   по расчету
3		0,65—0,95		—	0,33—0,38	0,6—0,8
4	0,33—0,38	0,9—1,2	0,4—0,45	1,0—1,2	0,33—0,38	0,9—1,11
5		1,1—1,4		1,15—1,25		1,1—1,3
6		—		—		1,2—1,4
		0,8—0,88		—		0,65—0,72
		1,06—1,18		—		0,86—0,95
		1,32—1,47		—		1,08—1,2
		1,6—1,79		—		1,29—1,43

Естественно, что по формуле (III.15) возможно и решение обратной задачи — по заданным пределам толщины покрытия рассчитать относительный вес  $\frac{G_{эп}}{G_{эс}}$ . Так, для электродов ЦМ-7 диаметром 4 мм  $\frac{G_{эп}}{G_{эс}} = 0,43 \div 0,53$ , а при диаметре 5 мм  $\frac{G_{эп}}{G_{эс}} = 0,41 \div 0,49$ . Для электродов УОНИ-13/45 диаметром 4 мм пересчет  $\delta$

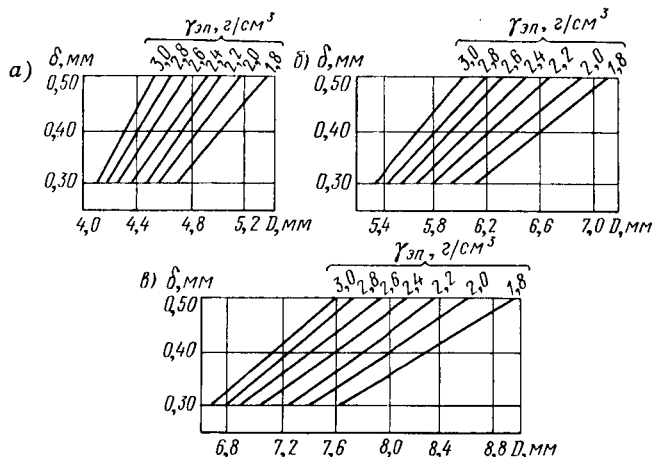


Рис. III.10. Зависимость наружного диаметра электрода  $D$  от относительного веса для различных удельных весов покрытия и различных диаметров электродных стержней: а —  $d_{эс} = 3$  мм; б —  $d_{эс} = 4$  мм; в —  $d_{эс} = 5$  мм

на относительный вес покрытия дает поле разброса  $\frac{G_{эп}}{G_{эс}} = 0,29 \div 0,41$ .

Для приближенного решения вопроса о назначении поля допусков на толщину покрытия по полю допусков на  $\frac{G_{эп}}{G_{эс}}$  возможно применение графиков [26], приведенных на рис. III.10.

В связи со сложностью решения вопросов разработки электродов для дуговой сварки, вследствие необходимости комплексного решения вопросов о металлургических процессах в системе стержень—покрытие—сварочная ванна, стабильности горения дуги и плавления электродов, отделимости шлака от застывающего металла, а также из-за особенностей самого изготовления электродов (см. § III.5), их расчетное проектирование пока невозможно.

Однако рассмотренные выше расчетные поиски, без сомнения, могут быть при таких разработках полезными, заметно сужая круг вопросов, требующих экспериментальной проверки.

### § III.5. Общие вопросы производства плавящихся электродов

Как уже указывалось, плавящиеся сварочные электроды представляют собой металлический стержень с нанесенным на него покрытием. Так как покрытие участвует в процессах формирования состава наплавляемого металла (его раскисления, легирования) и определяет защиту реакционного сварочного пространства (газовую, шлаковую), а также технологические характеристики электрода (устойчивость горения дуги и плавления электрода, поведение шлака и пр.), необходима достаточная стабильность свойств электрода по его длине.

Стабильность свойств электродного стержня в пределах его длины обеспечивается исходным материалом, из которого он изготовлен, — проволокой одного состава, достаточно постоянного сечения, прошедшей одинаковую технологическую обработку.

В электродном производстве проволоку, поставляемую металлургической промышленностью (по ГОСТу 2246—60 или определенным ТУ) в бухтах, правят, разрезают по длине на прутки и очищают от различных поверхностных загрязнений.

Стабильность покрытия должна обеспечиваться его достаточно одинаковым количеством на единице длины электрода (т. е. обеспечением  $\delta$  по рис. III.6 в определенных допусках и без значительного эксцентриситета расположения покрытия по отношению к стержню) и равномерностью состава. В связи с тем, что покрытие представляет собой смесь различных порошкообразных материалов, скрепленных между собой и со стержнем склеивающим связующим, необходимо стремиться, чтобы замес покрытия в момент нанесения на стержни был достаточно однородным. Этого, видимо, можно достичь при достаточной дисперсности тех порошков, которые будут использованы в шихте, и усреднением состава как порошковой шихты, так и замеса со связующим.

Измельченность порошков имеет значение и не только для возможности усреднения, выравнивания состава покрытия в каждом его объеме, но и сказывается на кинетике шлакообразования, газо-выделения и других важных характеристиках. Действительно, если газовая защита создается, например, распадом карбонатов, нужна их значительная удельная поверхность — отдельные частицы должны быть мелкими. Температура плавления шлака должна быть не очень высокой (см. § II.5), а температура плавления его составляющих в покрытии может быть более высокой ( $\text{CaO}$  из  $\text{CaCO}_3$  имеет  $T_{пл} \approx 2560^\circ \text{C}$ ;  $\text{SiO}_2 \sim 1730^\circ \text{C}$  и т. д.). Относительно легкоплавким является шлак из их смесей, растворов, комплексных соединений и эвтектик. Их образование осуществляется легче и быстрее при контакте элементарных окислов (галогенных соединений) по значительной поверхности и малом объеме каждой частицы, т. е. опять при достаточно измельченных материалах.

Конечно, различные материалы, используемые в покрытиях, требуют и различного измельчения. Так, целесообразность наличия более крупных частиц для некоторых ферросплавов отмечалась ранее (см. § II.6, рис. II.33). Можно указать и на технологические соображения, вытекающие из требований производства электродов: так, например, большое количество мелкодисперсных фракций в ряде случаев приводит к образованию трещин в электродных покрытиях в процессе сушки и прокали электродов [24, 51].

Из таких предпосылок должны выработываться требования к наиболее целесообразным размерам частиц различных материалов, используемых при изготовлении конкретных составов электродных покрытий. При этом следует стремиться к максимально допустимому по обеспечению технологии изготовления электродов измельчению шлако- и газообразующих составляющих и к ограничениям размеров частиц ферросплавов и легирующих из соображений их полезного использования в шихте покрытий.

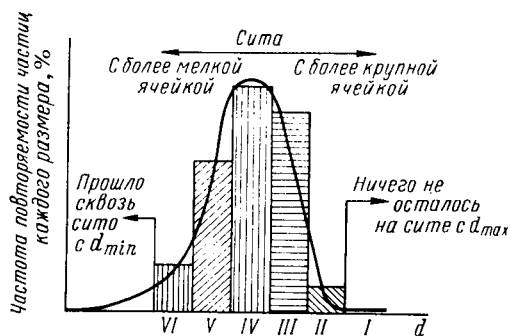


Рис. III.11. Распределение частиц по размерам, оцененное просевом через набор сит I—VI

Однако при производственных методах измельчения материалов обеспечить одинаковый размер огромного количества частиц не удастся (всегда получается комплекс частиц различного гранулометрического состава). Принципиально фактическое распределение частиц по размерам показано на рис. III.11. Повторяемость примерно одинаковых частиц имеет вид кривой, близкой по форме к кривой распределения вероятностей, но с ограничением в области больших размеров частиц (все крупные частицы раздроблены). Такое распределение может быть охарактеризовано просевом через сита I—VI:

	% вес
Осталось на сите I (с наибольшей ячейкой) . . . . .	0
» » » II (остальное прошло насквозь) . . . . .	3—4
» » » III (размер между $d_{II}$ и $d_{III}$ ) . . . . .	~25
» » » IV . . . . .	~35
» » » V . . . . .	~18
» » » VI . . . . .	~8
Прошло через сито VI («пыль» осталась в тазике) . . . . .	~13

Как следует из этой схемы, максимальное количество частиц будет в интервале от  $<d_{II}$  до  $>d_{VI} - 25 + 35 + 18 = 78\%$ .

Обычно применяемые размеры частиц материалов электродных покрытий проверяются ситами с размерами по ГОСТу 3584—53

(или ГОСТу 6613—53) от 0,45 (т. е. 252 отверстия на  $1 \text{ см}^2$  при размере ячейки 0,45 мм) до 007 (6400 отверстий на  $1 \text{ см}^2$ , ячейка 0,071 мм).

Выборочные сведения по ситам из ГОСТа 3584—53 приведены в приложении VIII.

Порошкообразные измельченные материалы при принятой в нашей стране схеме электродного производства, получают в электродных цехах переработкой исходных продуктов, поступающих в основном в виде кусков того или иного размера\*. Правда, некоторые материалы поступают в электродное производство уже в виде порошков (например, крахмал, сода) и измельчения не требуют.

В качестве связующих в электродном производстве в основном применяются силикатные растворы — натриевые, реже калиевые жидкие стекла. Кроме того, в покрытиях они являются одновременно ионизаторами (вводя  $\text{Na}_2\text{O}$  или  $\text{K}_2\text{O}$ ), а также влияют на формирование состава шлака. В электродном производстве в зависимости от метода нанесения покрытия на стержни — окунанием или опрессовкой, жидкие стекла применяются различной плотности. Так, при нанесении покрытий окунанием обычная плотность  $\gamma_{\text{жс}} = 1,30 \div 1,35 \text{ г/см}^3$ , а применительно к опрессовке  $\gamma_{\text{жс}} \approx 1,5 \text{ г/см}^3$ .

Жидкие стекла характеризуются модулем (молекулярным соотношением  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  или  $\text{K}_2\text{O}$ ), плотностью (т. е. относительной степенью разведения водой — кристаллизационной и свободной), вязкостью и клеящей способностью. Упрощенно, не уточняя распределение воды и отнеся ее к кристаллизационной, формулу наиболее часто применяемого натриевого жидкого стекла можно представить как  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ . Модуль  $n$  стекл, обычно применяемых в электродном производстве, составляет 2,6—3,0. Зарубежные фирмы применяют и более высокомолекулярные стекла.

Связь между плотностью, вязкостью и модулем жидкого натриевого стекла при комнатной температуре приведена на рис. III.12. Как следует из этой зависимости, при постоянном модуле даже незначительное изменение плотности может изменять вязкость в десятки раз (от сотен до тысяч сантипуаз). На вязкость также очень значительно влияет и температура жидкого стекла (рис. III.13). Имеются указания, что в обычно применяемом диапазоне вязкости клейкость жидких стекол прямо пропорциональна вязкости [5].

Весьма важной характеристикой жидкого стекла для оценки состава электродных покрытий является величина сухого остатка. Связь между модулем, плотностью и сухим остатком (в % от ис-

---

\* Заграничные фирмы в основном получают на электродопроизводящие предприятия необходимые сыпучие материалы уже в виде готовых порошков, поставляемых другими фирмами-изготовителями.

ходного количества раствора) для натриевого жидкого стекла приведена на рис. III.14.

Раствор жидкого стекла может химически взаимодействовать с ферросплавами — ферросилицием и ферромарганцем. В общем виде реакция кремния с водой и жидким стеклом может быть представлена формулами:

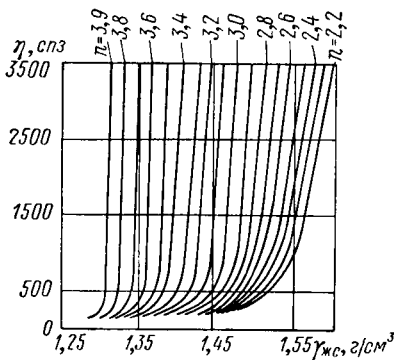
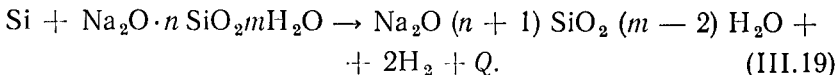
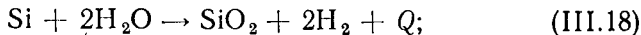


Рис. III.12. Зависимость вязкости  $\eta$  растворов жидкого стекла от плотности  $\gamma_{жс}$  при различных значениях модуля  $n$  и постоянной температуре

В результате такой реакции изменяется модуль жидкого стекла (или выпадает сво-

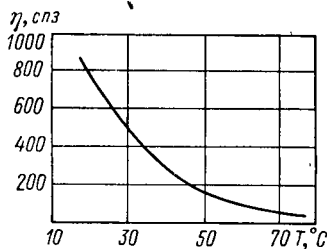
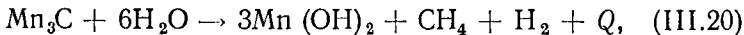


Рис. III.13. Зависимость вязкости  $\eta$  раствора жидкого стекла от температуры при модуле  $n = 2,74$  и плотности  $\gamma_{жс} = 1,502 \text{ г/см}^3$

бодный  $\text{SiO}_2$ ) и его плотность (т. е. те физические свойства, которые важны для него как для связующего), окисляется кремний (что исключает его дальнейшее использование как раскислителя или легирующей добавки), масса покрытия пузырится. Выделяющееся тепло ускоряет реакцию и портит обмазочную массу и покрытие.

Реакция воды с ферромарганцем имеет вид



т. е. также приводит к окислению марганца, выделению газов и нагреву массы.

Интенсивность реагирования несколько снижается с увеличением модуля стекла.

Снижения активности ферросплавов по отношению к жидкому стеклу можно достигнуть пассивированием — созданием на частицах окисной пленки. Это не исключает возможности прохождения рассмотренных выше реакций после растворения этих пленок, но приводит к увеличению инкубационного периода — реакция



начинается не сразу, а только (при хорошей пленке) через несколько часов, что оказывается достаточным для использования полученной массы для изготовления электродов.

Такое пассивирование порошкообразных ферросплавов может быть получено путем их естественного окисления длительной выдержкой в обычной атмосфере, а также ускорено нагревом в печах с окислительной атмосферой или посредством замачивания порошков водой, подкисленной марганцевокислым калием ( $KMnO_4$ ) или

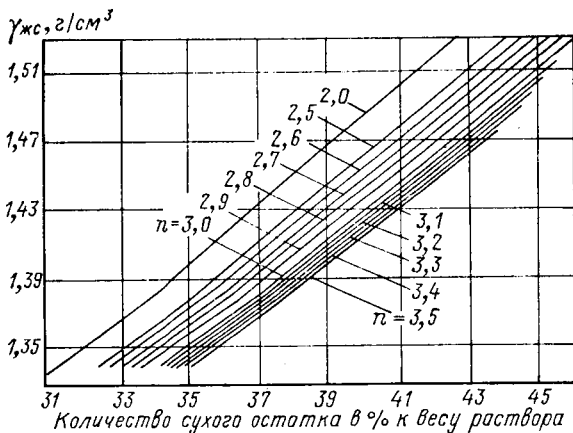


Рис. III.14. Изменение количества сухого остатка растворов жидкого стекла в зависимости от их плотности  $\gamma_{жс}$  и модуля  $n$

хромпиком ( $K_2Cr_2O_7$ ). Иногда хромпик вводится в количестве  $\sim 0,5\%$  в силикатную глыбу перед разваркой жидкого стекла.

Влияние режима тепловой обработки ферросилиция на газо-выделение при реакции жидкого стекла с ферросилицием и ферромарганцем приведено на рис. III.15 [28].

Нанесение массы покрытия на стержни осуществляется окунанием и опрессовкой. В настоящее время нанесение покрытия окунанием применяется только при изготовлении мелких партий специальных электродов (например, для твердых наплавок, сварки цветных металлов и др.). Для электродов общего назначения (для сварки широкого круга конструкционных и теплоустойчивых сталей), а также и специальных, но применяемых достаточно широко (например, некоторых марок аустенитных электродов), изготовляемых массовым методом или большими партиями, покрытия наносят опрессовкой под большим давлением.

Консистенция обмазочной массы для нанесения покрытия тем или другим способом должна быть различной. Так как для нанесения окунанием обмазочная масса должна иметь сметанообразную консистенцию, которая может количественно оцениваться различными технологическими пробами. На Ленинградском Кировском

заводе, например, разработана проба по диаметру растекания мерного количества покрытия по горизонтальному стеклянному листу под собственным весом [27]. Характер влияния количества вводимого жидкого стекла в шихту электродов МЭЗ—04К на растекание и некоторые характеристики наносимости покрытия на стержни приведен на рис. III.16 [27].

Для нанесения покрытий опрессовкой масса должна иметь консистенцию оконной замазки. Контроль за консистенцией возможен

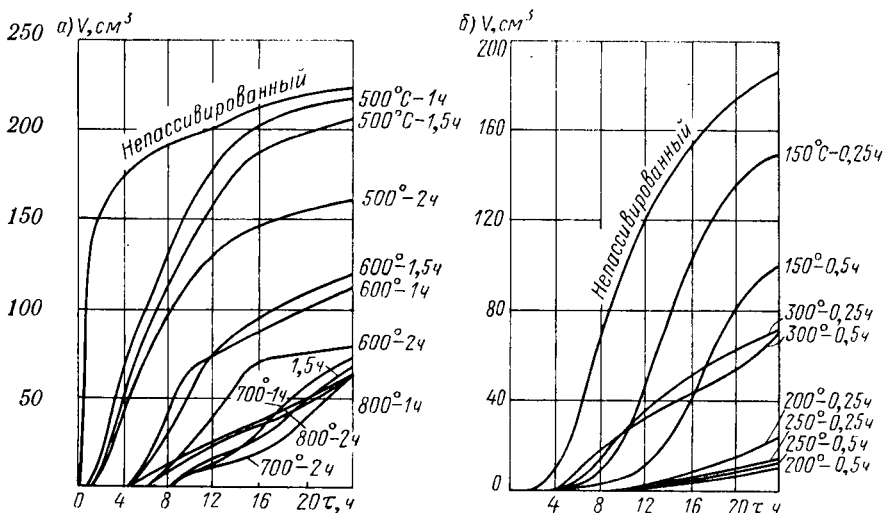
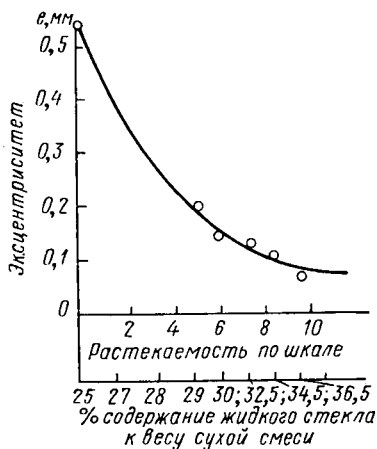


Рис. III.15. Зависимость объема  $V$  выделившихся газов от времени  $\tau$  взаимодействия ферросилиция (а) и ферромарганца (б) с жидким стеклом

продавливанием прессом с постоянной скоростью определенного объема обмазочной массы через калиброванное отверстие [5]. В современные высокопроизводительные электрообмазочные агрегаты масса обычно вводится в виде брикетов, форма которых обеспечивает быструю загрузку цилиндра пресса.

Основные показатели качества нанесения покрытия — равномерность его расположения по длине, количество (толщина) покрытия, концентричность расположения относительно стержня — определяются и качеством обмазочной массы, и режимом нанесения покрытия. При нанесении окунанием в этом отношении важны вертикальность извлечения стержня из обмазочной массы, постоянство скорости извлечения и равномерность массы, поддерживаемая периодически ее перемешиванием. Важно также, чтобы покрытие не стекало по стержню в период сушки. При нанесении покрытия опрессовкой эти характеристики достигаются при правильной конструкции обмазочной головки пресса точным расположением каналов, направляющих стержни, и фильеры, ограничивающей размер покрытия. Наилучшие условия для получения

покрытия, расположенного concentрично стержню, достигаются при соосном движении в электрообмазочном агрегате и стержней, и обмазочной массы, выдавливаемой прессом. В связи с большими трудностями создания такой конструкции прессов обычно канал для подачи массы в обмазочную головку изменяет ее направление с максимальным приближением к касательной по отношению к подаваемым в головку стержня. Высокие давления при этом придают такую плотность покрытию в момент выхода электрода из пресса, что перетекание массы при сушке исключается и сушка происходит при их горизонтальном расположении. В процессе сушки и прокали диаметр электрода с покрытием несколько увеличивается — покрытие распухает. Так, для покрытий типа УОНИ-13/45 диаметр электрода увеличивается при сушке на 0,1—0,2 мм по сравнению с диаметром его в момент выхода из пресса [5].



Сушка и прокалка электродов должны удалить воду из покрытия. При этом следует учитывать, что воды в покрытиях много. Для примера оценим количество воды, которое должно быть удалено из покрытия, нанесенного окунанием. При этом примем, что относительный вес покрытия

$$\frac{G_{ан}}{G_{эс}} \approx 0,35 \text{ и по рецепту}$$

к шихте добавляется 30% жидкого стекла плотностью 1,34 г/см<sup>3</sup> при модуле 2,8. Согласно рис. III.44, сухой остаток в таком стекле ~33%, т. е. в нем ~  $\frac{2}{3}$  воды. Тогда  $\frac{110}{130}$  шихты и жидкого стекла остается на электроде в виде покрытия с удаленной водой (и определяет  $\frac{G_{ан}}{G_{эс}}$  как 35% от веса стержней), а  $\frac{20}{130}$  удаляется в виде паров воды.

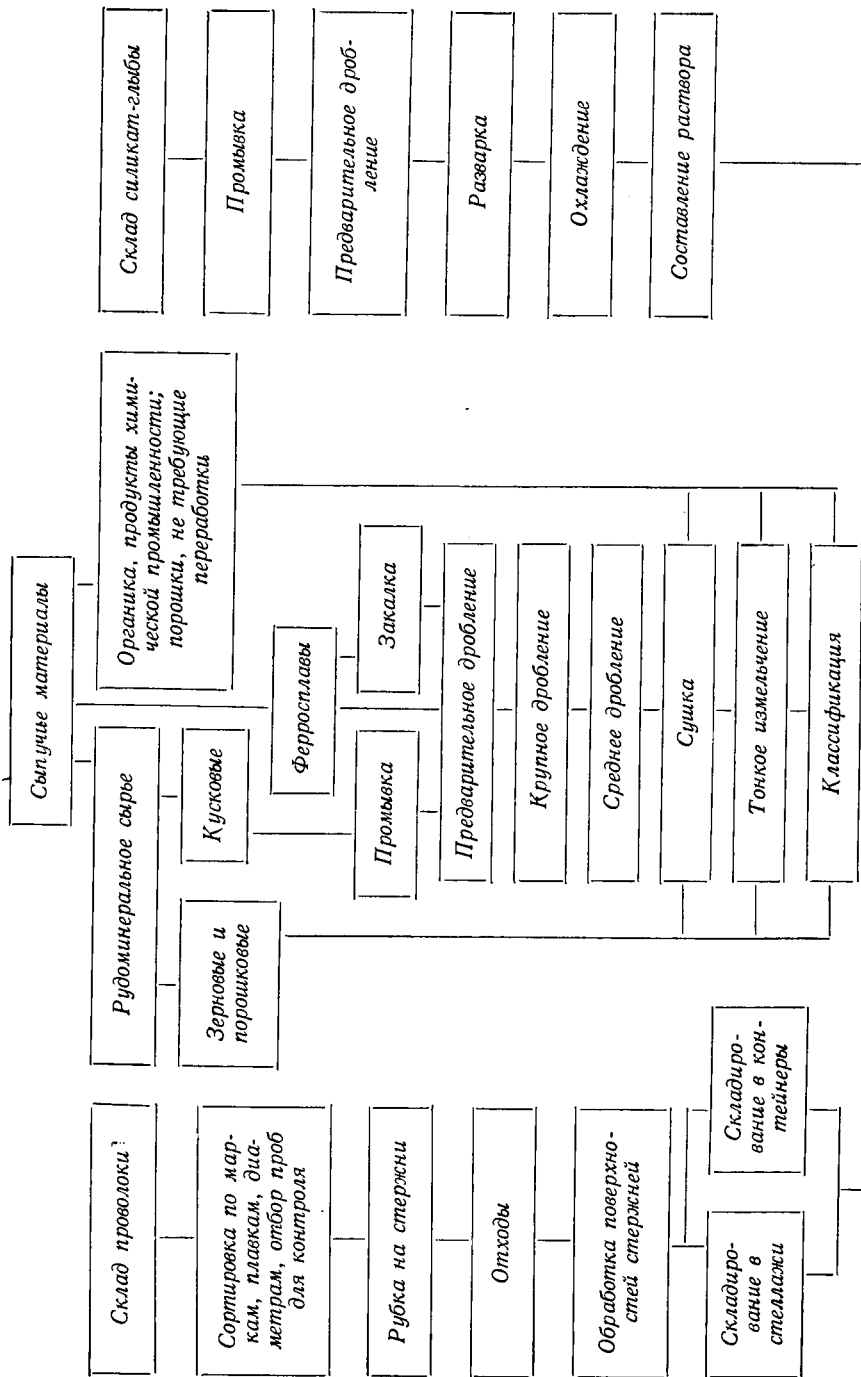
На 100 кг электродов получаем покрытия (в высушенном и прокаленном состоянии):

$$100 = G_{эс} + G_{ан} = G_{эс} + 0,35G_{эс} = 1,35G_{эс};$$

$$G_{эс} = \frac{100}{1,35} = 74 \text{ кг}; \quad G_{ан} = 100 - G_{эс} = 26 \text{ кг};$$

$$26 \text{ кг (покрытия)} - \frac{110}{130};$$

$$x \text{ кг (воды)} - \frac{20}{130}; \quad x = \frac{26 \cdot 20 \cdot 130}{130 \cdot 110} \approx 4,7 \text{ кг}.$$



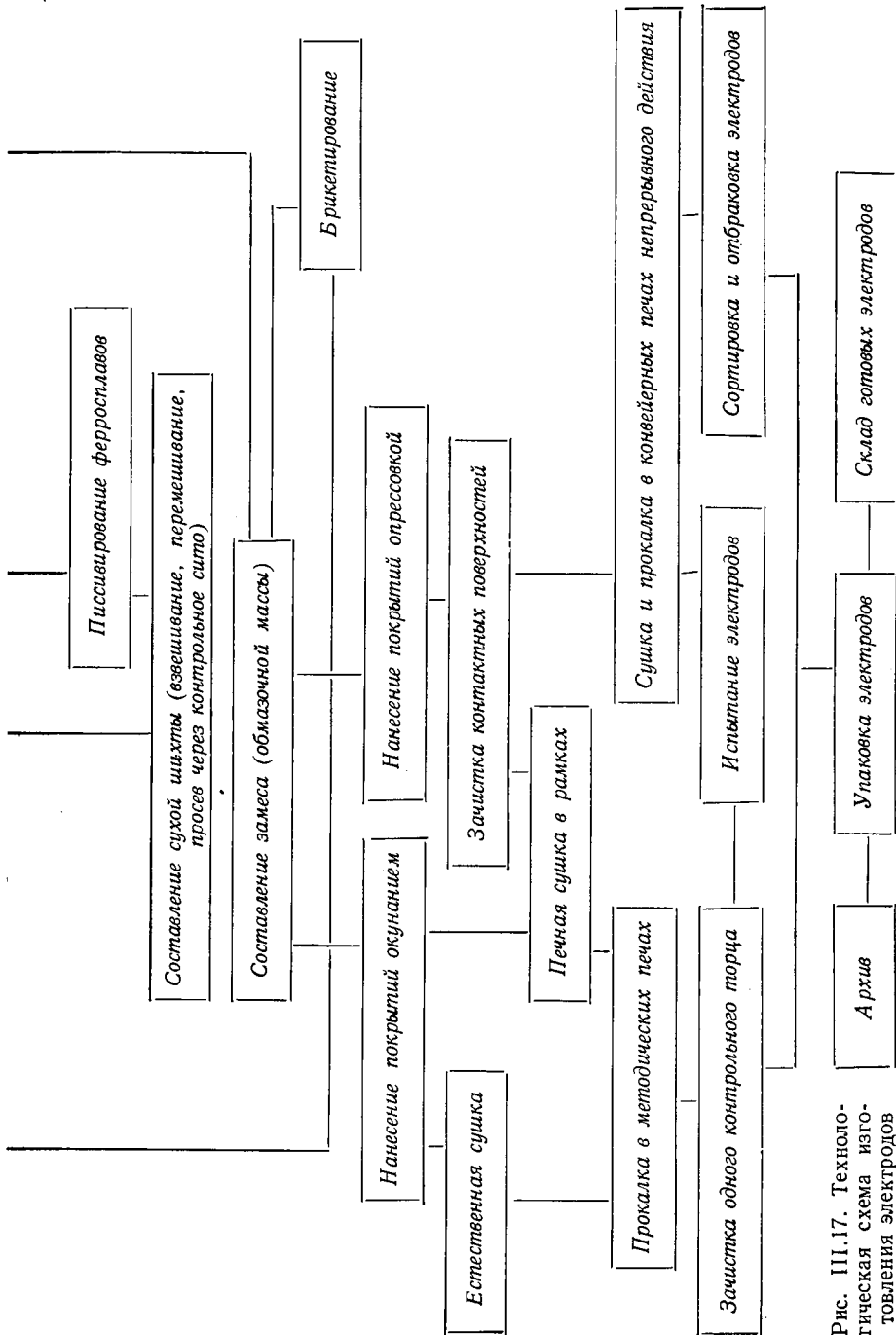


Рис. III.17. Технологическая схема изготовления электродов

Если представить себе такое удаление влаги в помещении без обмена воздухом при  $20^{\circ}\text{C}$  и начальной относительной влажности воздуха  $70\%$ , то можно подсчитать тот объем помещения, при котором от испарения воды из покрытий электродов будет достигнута точка росы. Насыщение воздуха влагой при  $20^{\circ}\text{C}$  наступает при наличии  $17\text{ г}$  воды в  $1\text{ м}^3$  воздуха. При относительной влажности  $70\%$  воды в воздухе будет  $17 \cdot 0,7 = 11,9\text{ г/м}^3$ . До насыщения в  $1\text{ м}^3$  надо увеличить количество влаги на  $17 - 11,9 = 5,1\text{ г}$ . Тогда объем помещения (без обмена воздуха) должен быть  $V = \frac{4700}{5,1} = 920\text{ м}^3$ .

В примере количество влаги, удаляемой при сушке покрытия, взято с избытком. Обычно от сушки к прокатке могут подаваться электроды с остаточной влажностью  $4-4,5\%$ , т. е. при весе покрытия  $26\text{ кг}$  на  $100\text{ кг}$  электродов остаточная влага может быть  $26 \times 0,04 \approx 1\text{ кг}$ , т. е. масса удаляемой воды при сушке будет не  $4,7\text{ кг}$ , а примерно  $3,7\text{ кг}$ . Кроме того, при прессовом нанесении покрытия воды в нем заметно ( $\sim$  в  $1,4$  раза) меньше, чем при нанесении окунанием. Однако приведенный расчет принципиально показывает, с какими количествами воды приходится иметь дело при сушке и прокатке электродов.

Сушка может быть естественная, при комнатной температуре, и ускоренная, в различных печах.

При прокатке осуществляется дальнейшее удаление влаги и иногда кристаллизационной воды. Температура прокатки ограничивается как отдельными составляющими покрытия, например при наличии в покрытии органических соединений — температурой их распада (для крахмала около  $230^{\circ}\text{C}$ ), так и отсутствием откалывания покрытия от стержня вследствие различия их коэффициентов теплового расширения. Например, покрытия типа УОНИ-13/45 на стержнях из низкоуглеродистой или низколегированной проволоки нельзя прокатывать при температуре выше  $500-525^{\circ}\text{C}$ .

Из всего сказанного следует, что производство электродов требует весьма различных технологических операций как по обработке материалов, так и электродов в целом. Общая технологическая схема изготовления сварочных плавящихся электродов приведена на рис. III.17. Схема показывает, что в электродном производстве имеется три потока обработки материалов: обработка стержней, сыпучих материалов и силикатной глыбы, а также поток обработки электродов с нанесенным на стержни покрытием.

Все это требует специфического оборудования, которое становится целесообразным максимально механизировать и автоматизировать только при достаточно большой программе производства электродов. В связи с этим типовые проекты электродных цехов, разработанные Гипрометизом, рассчитаны на производительность электродных заводов в  $20\ 000$  и  $30\ 000\text{ т/год}$ .

## § III.6. Основные характеристики технологического оборудования электродного производства

В технологическом процессе обработки проволоки применяются правильно-отрезные станки и оборудование для очистки поверхностей стержней.

Правильно-отрезные станки осуществляют правку проволоки, поставляемой в бухтах, и ее разрезку на мерные стержни для электродов,

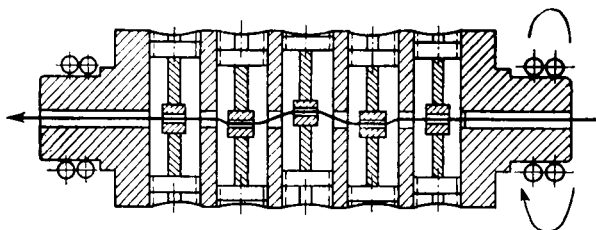


Рис. III.18. Схема правки электродной проволоки

тродов, длина которых определяется составом проволок (ее удельным электрическим сопротивлением) и диаметром.

Правка во всех случаях осуществляется быстровращающимся барабаном с правильными сухарями (рис. III.18). Разворачивающаяся с мотовила проволока затягивается в барабан, где, про-

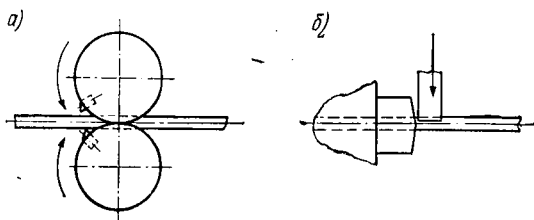


Рис. III.19. Схема рубки электродной проволоки летучими (а) и гильотинными (б) ножами

ходя между вращающимися со скоростью 3560—8000 об/мин правильными сухарями, многократно перегибается с остаточной пластической деформацией и выходит из барабана выпрямленной.

Регулировка осуществляется соответствующим расположением сухарей, вызывающих перегибы проволоки.

Рубка осуществляется либо летучими ножами, либо гильотиной, перемещающейся в процессе резки со скоростью протягивания проволоки и затем возвращающейся в исходное положение.

Схемы рубки приведены на рис. III.19. Конструктивно более просты станки с летучими ножами, но они не всегда обеспечивают

необходимую точность отрезаемого торца и могут применяться для резки только мягкой низкоуглеродистой проволоки.

Производительность правильно-отрезных станков в зависимости от типа и длины отрезаемых стержней составляет  $\sim 100\text{--}500$  штук в минуту.

Очистка поверхности стержней от следов графитовой смазки, ржавчины и других загрязнений осуществляется травлением или сухим способом. Травление дает в ряде случаев нежелательное насыщение металла водородом. Наиболее распространены вращающиеся барабаны с песком и древесными опилками. При цикле

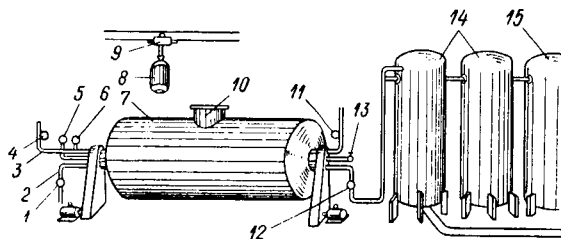


Рис. III.20. Схема процесса производства жидких стекол из силикатной глыбы:

- 1 — вентиль; 2, 3 — трубопроводы; 4 — запорный клапан;  
5, 6 — манометры; 7 — автоклав; 8 — кубель; 9 — блок;  
10 — приемный патрубок; 11, 12, 13 — запорные клапаны;  
14 — отстойники; 15 — расходные баки

очистки 15—25 мин производительность таких барабанов достигает 300 кг/ч. Недостатком такого способа является возможность искривления стержней.

Подготовленные к нанесению покрытия стержни должны удовлетворять допускам на диаметр (в соответствии с ГОСТом 2246—60), по длине ( $\pm 3$  мм), по стреле прогиба (0,5—1,0 мм), по заусеницам и волнистости (в зависимости от диаметра проволоки) и по углу реза ( $72\text{--}90^\circ$  — для всех диаметров). Подготовленные стержни складываются или передаются конвейером (в массовом производстве) в бункера электрообмазочных агрегатов).

Для изготовления жидкого стекла из поступающей силикатной глыбы необходима операция разваривания. Наиболее распространенная схема этой операции с использованием вращающегося автоклава показана на рис. III.20. Емкость автоклавов может быть различной — от 1,5 до 6 м<sup>3</sup> [5]. Силикатная глыба подается к автоклаву тельфером и загружается в него. Затем автоклав заполняется водой для промывки глыбы при вращении. В зависимости от загрязнения глыбы вода сменяется 2—3 раза. Затем автоклав снова заполняется водой, полностью герметизируется, и в него подается горячий пар под давлением около 6 кг/см<sup>2</sup>. Автоклав при разварке вращается. Процесс разварки длится 2—3 ч.



После завершения разварки стекло перегоняется в отстойники, где для получения лучших клеящих свойств отстаивается 7—10 суток. Затем стекло перегоняется в расходные баки и из них в поточную линию приготовления обмазочной массы.

Наиболее разнообразно оборудование для переработки сыпучих материалов. Как следует из рис. III.17, некоторые из таких материалов поступают в электродное производство уже в виде порошков, не требующих дополнительного измельчения, или же в частицах, сразу идущих на тонкое измельчение. Для других материалов необходимы операции крупного дробления, среднего дробления и измельчения. Все это требует специфического оборудования. Хотя известно, что на одном и том же оборудовании принципиально можно осуществить размол от крупных кусков до мелочи, однако

производительность измельчения при этом очень низка. Эффективно работает однотипное оборудование только при измельчении материала в 10—40 раз. Поэтому для большей степени измельчения требуется применять разнообразные устройства. Схематически связь измельчения с продолжительностью работы таких типовых устройств демонстрируется рис. III.21. Так, например, если оборудование типа I достаточно быстро может довести размер частиц  $d_1$  до  $d_2$ , причем  $d_2 = \left(\frac{1}{10} \div \frac{1}{40}\right) d_1$ , то дальнейшее измельчение на этом оборудовании уже очень малопродуктивно. То же относится и к оборудованию типа II, только в этом случае  $d_3 = \left(\frac{1}{10} \div \frac{1}{40}\right) d_2$ .

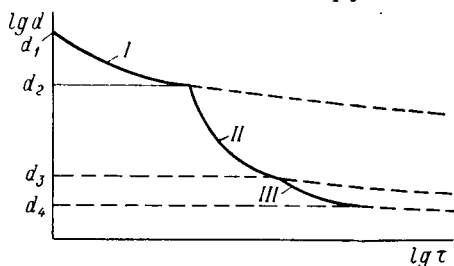


Рис. III.21. Изменение производительности оборудования для дробления в пределах изменения размера дробящихся частиц

Наиболее распространенными для крупного дробления являются щековые дробилки (рис. III.22). Обычно они эффективно дробят хрупкие материалы на куски размером от 150—250 мм до 10—30 мм. Их производительность зависит от свойств обрабатываемого материала и составляет  $\sim 1—10$  т/ч. Иногда, если исходные куски имеют размер более  $\sim 200$  мм, перед дроблением щековой дробилкой применяется их предварительное дробление прессами или кувалдой.

Для среднего дробления наиболее широко используются дробильные вальцы с гладкими валками. Дробление осуществляется пропусканием хрупкого материала через вальцы с установленным регулированием зазором. Исходный размер кусков, подаваемых в такие вальцы, в зависимости от их конструкции и мощности

электродвигателей может быть от 3 до 50 мм. Размер частиц после размола в вальцах составляет обычно 2—10 мм. Схема такой дробилки приведена на рис. III.23.

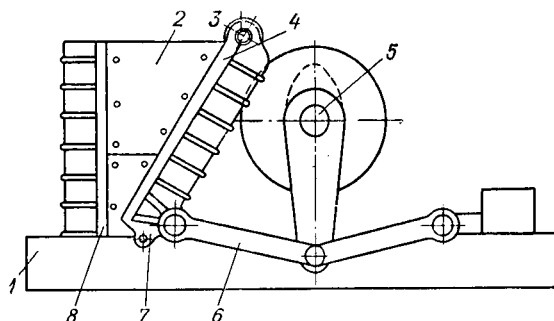


Рис. III.22. Щековая дробилка для крупного дробления:

1 — рама; 2 — броневая плита; 3 — ось подвижной щеки; 4 — подвижная щека; 5 — эксцентриковый вал; 6 — шатун; 7, 8 — сменные дробящие плиты

Перед тонким измельчением ряд материалов должен проходить сушку для удаления влаги. Температура сушки зависит от свойств материала: например, мрамор во избежание его диссоциации следует сушить при температурах не выше 650° С.

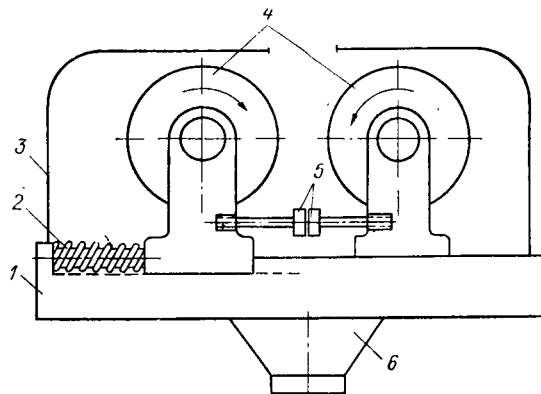


Рис. III.23. Дробилка с гладкими вальцами:

1 — рама; 2 — предохранительная пружина; 3 — предохранительный кожух; 4 — вальцы (направление вращения показано стрелками); 5 — резиновые буфера; 6 — сборник продуктов размола

Измельчение осуществляется в шаровых или стержневых мельницах. Шаровые мельницы имеют периодического и непрерывного действия.

Мельницы, работающие в периодическом цикле, загружаются материалом, который должен быть измельчен, и стальными ша-

рами. При вращении барабана со скоростью  $n = \frac{32}{\sqrt{D}}$  об/мин, где  $D$  — диаметр барабана в м, происходит наиболее эффективное дробление. В целом зависимость распределения частоты повторения измельченных частиц от длительности работы мельницы представлена на рис. III.24. Чем дольше работает мельница, тем больше увеличивается относительная доля мелких частиц, а их распределение остается подобным ранее представленному на рис. III.11.

Естественно, что показанные на рис. III.24 зависимости количественно будут повторяться при повторных размолах только при постоянстве свойств раздробляемого материала и постоянном режиме работы конкретной мельницы. Тогда при подборе режима работы мельницы для определенного материала можно избежать общего просева и контролировать степень размола всей загрузки только выборочно, посредством определения остатка на сите относительно крупной ячейкой.

Мельницы непрерывного действия характеризуются тем, что поступление в них материала, подлежащего измельчению, и удаление продуктов размола нужного размера осуществляются без остановки в работе. Их целесообразно применять специализированно, для размола определенного материала (мрамора, кварцевого песка и др.), используемого в данном производстве в значительном объеме.

Простая схема установки непрерывного действия показана на рис. III.25. Материал поступает в мельницу через загрузочную воронку, а измельченный материал, прошедший через сита, вделанные в корпус, удаляется через разгрузочную воронку.

Наиболее механизированными устройствами являются установки с воздушной-транспортировкой измельченных материалов. В этом случае частицы достаточно тонкого помола отсасываются воздушным циклоном, сепарируются по размерам и перемещаются в бункера готового продукта. Схема такого дробильного агрегата приведена на рис. III.26. Гранулометрический состав готовых порошков практически может регулироваться в широких пределах изменением расхода воздуха, скоростью подачи материала в мельницу и регулировочными устройствами установки.

При размоле некоторых ферросплавов, в основном ферромарганца, следует опасаться взрывов мелкой взвешенной в воздухе пыли. Для этого к загружаемому материалу обычно добавляют

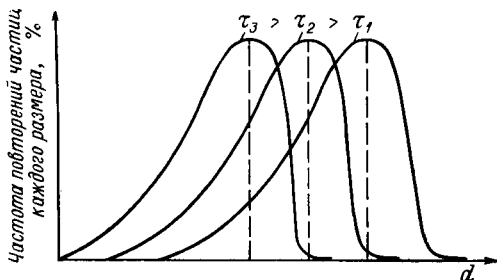


Рис. III.24. Схема распределения частиц различного размельчения  $d$  при различной длительности работы шаровой мельницы

готовую пудру инертного материала, который затем учитывается при шихтовке. Так, при размоле ферромарганца для покрытий типа УОНИ-13 к нему добавляется плавиковый шпат, а для покры-

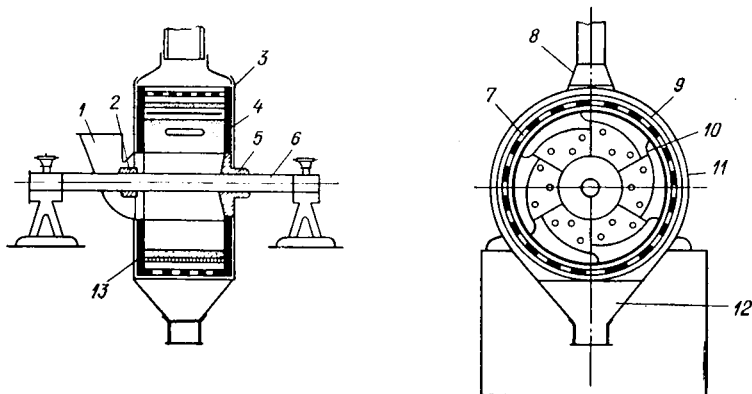


Рис. III.25. Шаровая мельница непрерывного действия:

1 — загрузочная воронка; 2 и 5 — ступицы для крепления корпуса к валу; 3 — торцевые стенки; 4 и 13 — защитные плиты; 6 — вал; 7 — предохранительное сито; 8 — вентиляционный патрубок; 9 — классифицирующее сито; 10 — сегментные плиты; 11 — кожух; 12 — разгрузочная воронка

тия ОММ-5 — полевой шпат. При мельницах периодического действия перед снятием крышки разгрузочного люка необходима выдержка для того, чтобы пыль осела. В ряде случаев для исклю-

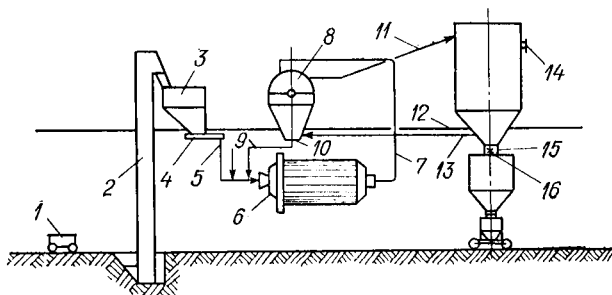


Рис. III.26. Схема дробильного агрегата непрерывного действия с применением пневмотранспорта, воздушного сепаратора и циклона:

1 — тележка с материалом, подлежащим измельчению; 2 — ковшовый элеватор; 3 — расходный бункер; 4 — питатель подачи материалов в мельницу; 5 — питающий трубопровод; 6 — шаровая мельница; 7 — трубопровод в сепаратор; 8 — воздушный сепаратор; 9 — трубопровод возврата отсева для измельчения; 10 — клапан сепаратора; 11 — трубопровод мелких фракций; 12 — труба с клапаном подсоса воздуха; 13 — трубопровод возврата воздуха из циклона; 14 — выброс избытка воздуха; 15 — клапан циклона; 16 — трубопровод в бункер

чения взрывов внутреннюю полость шаровой мельницы заполняют инертным газом.

Классификация порошков, если это необходимо по условиям их предварительной обработки, является операцией, проведение

которой необходимо производить без распространения пыли в рабочих помещениях. Обычно эта операция осуществляется механизированными, в частности вибрационными ситами. Схема вибрационного сита Славяновского завода приведена на рис. III.27.

Подготовленные порошки соответствующей грануляции, подвергнутые в случае необходимости дополнительной обработке (пассивирование ферросплавов, сушка порошков после мокрого помола), идут на приготовление сухой шихты. Шихта составляется по рецепту покрытия. При малых порциях развес осуществляется простейшими способами. В массовом производстве для этих целей применяются весы-автоматы, в частности производства Киевского завода порционных автоматов.

Взвешивание осуществляется с точностью 0,1—0,2% от веса порции. Применение дозаторов весьма удобно благодаря дистанционному управлению и безвредности.

Для перемешивания и выравнивания состава шихты она из бачков (кюбелей) поступает в смесители типа «пьяная бочка»,

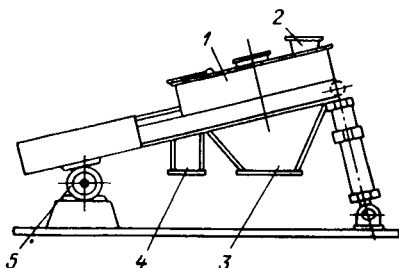


Рис. III.27. Вибрационное сито:

- 1 — короб с сетками (предохранительная сетка № 10—15, рабочая № 40 площадью 0,6 м<sup>2</sup>); 2 — труба, для подачи материала на сито; 3 — выход годного продукта; 4 — труба для выхода возврата (отсевов); 5 — электромагнитный привод, обеспечивающий 3000 колебаний в минуту с амплитудой 0,5—1,0 мм

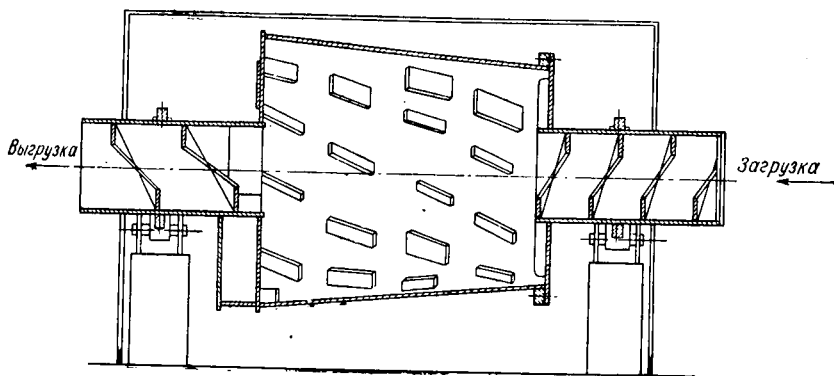


Рис. III.28. Барабанный реверсивный смеситель конструкции Гипрометиза

бегунковые или реверсивные. Реверсивные смесители конструкции Гипрометиза являются наиболее совершенными и производительными. Схема такого смесителя приведена на рис. III.28.

Качество перемешивания проверяется внешним осмотром по однородности цвета готовой шихты и отбором проб на химический анализ.

Из приготовленной шихты и дозированного количества жидкого стекла готовится обмазочная масса. Ее перемешивание осуществляется лопастными или бегунковыми смесителями.

При подготовке обмазки под нанесение ее на стержни опрессовкой она подготавливается далее в виде плотных цилиндрических брикетов. Для этого используются конструктивно простые брикетировочные прессы. Размер брикетов подбирается так, чтобы они были удобны для загрузки в цилиндры электрообмазочного пресса, агрегата.

Нанесение покрытий окунанием не требует сложного оборудования, однако является малопроизводительным и не обеспечи-

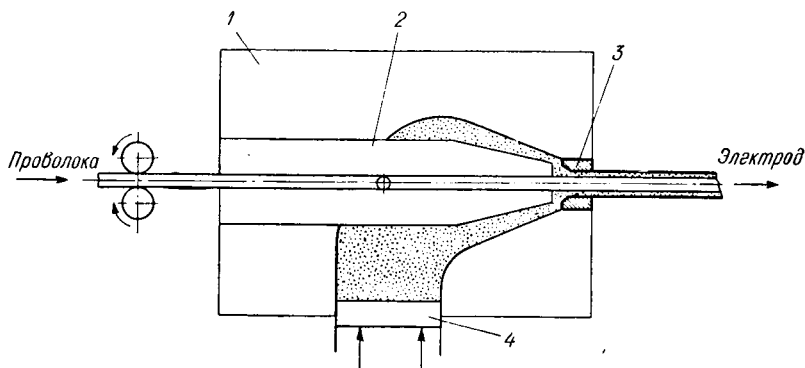


Рис. III.29. Схема обмазочной головки:

1 — корпус; 2 — проволочные втулки; 3 — калибрующая фильера; 4 — поршень прессы

вает достаточной стабильности качества покрытия. Обычно при этом способе стержни зажимаются в рамки и погружаются в бачок с обмазочной массой. Равномерная толщина покрытия достигается постоянной скоростью извлечения стержней из массы. Рамка с обмазанными стержнями подвешивается для сушки. Механизация процессов погружения и извлечения обмазанных стержней посредством вертикального перемещения бака с массой является непроизводительной.

В массовом производстве основным видом нанесения покрытия является опрессовка.

Электрообмазочные агрегаты механизировано подают в пресс электродные стержни, поступающие поштучно из бункера на конвейер подачи их в обмазочную головку. Обмазочная масса подается давлением поршня в головку из цилиндра прессы, куда она загружалась в виде брикетов.

Весьма важной является конструкция обмазочной головки. Наиболее распространенная в настоящее время схема такой головки показана на рис. III.29. Корпус головки крепится к обмазочному цилиндру прессы. В проволочные втулки, вставляемые в сердечники, механизмом подачи подаются стержни, причем

последующий проталкивает предыдущий. Обмазочная масса выдавливается через сопло, изготовленное из твердого сплава и устанавливаемое с кольцевым зазором  $\sim 2$  мм от проволоочной

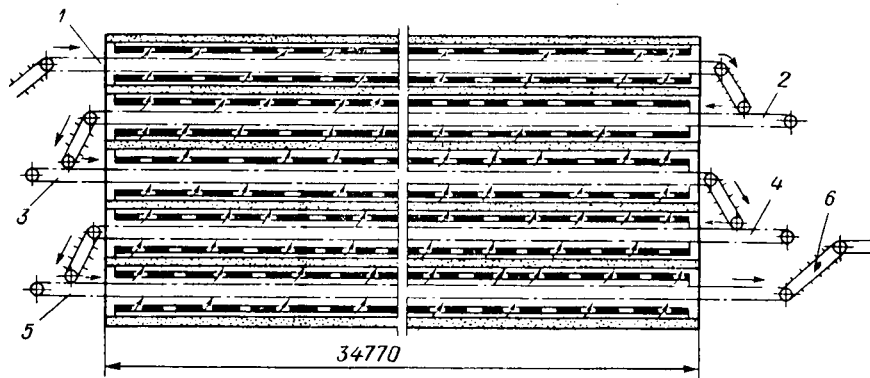


Рис. III.30. Схема сушильно-прокалочной печи ОКБ-463:

1—4 — зоны предварительной сушки; 5 — зона прокалики; 6 — транспортер, передающий электроды на сортировочный стол

втулки. Опрессовавшее стержни покрытие срезается калибрующей фильерой, получая необходимый диаметр. Электроды с покрытием согласно стрелке выдаются на транспортер, переносящий их на дальнейшую обработку. Для регулировки concentричности нанесения покрытия расположение фильеры может изменяться регулирующими винтами.

Транспортер в первую очередь подает горизонтально расположенные электроды в зачистное устройство, которое вращающимися щетками снимает покрытие на торцах стержней для возможности создания электрического контакта электрода с держателем и с изделием в момент начала сварки. После этого электроды поступают на сушку.

В массовом производстве сушка и прокалика осуществляются в печах.

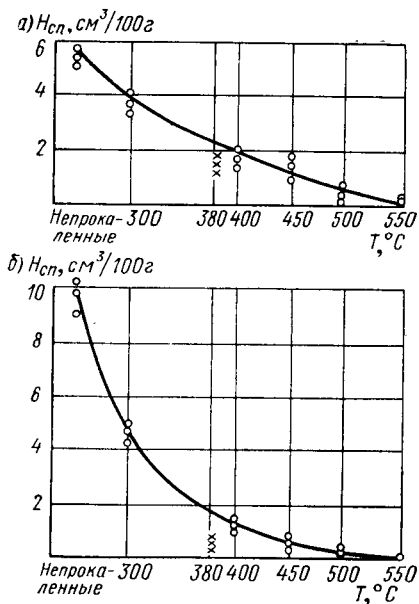


Рис. III.31. Влияние температуры прокалики электродов на содержание водорода в металле, наплавленном электродами УОНИ-13/45 (а) и 10ХН2М (б):

О — в обычной печи; X — в вакуумной печи

Схема сушильно-прокалочной печи СКБ-53А представлена на рис. III.30.

Влияние температуры прокалки электродов с фтористо-кальциевым покрытием на конечное содержание водорода в наплавленном металле, полученном в сопоставимых условиях, приведено на рис. III.31 [34]. Так как снижение содержания водорода в сварных соединениях в ряде случаев очень важно, необходим правильный выбор режимов прокалки.

Готовые электроды после прокалки по транспортеру передаются на сортировочный стол, где их упаковывают в пачки и направляют на склад.

В электродном производстве весьма важен контроль качества. Он осуществляется для исходных материалов, в отношении различных операций обработки, а также готовых электродов. Контрольными испытаниями электродов определяются их технологические свойства, прочность покрытия, химический состав наплавленного металла, а также свойства сварных соединений, выполненных этими электродами.

### § III.7. Неплавящиеся электроды для дуговой сварки

Так называемые неплавящиеся электроды применяются при различных дуговых процессах. В сварочном производстве они используются при сварке угольным электродом по способу Н. Н. Бенардоса, при сварке в защитных инертных газах, при атомно-водородной сварке, в некоторых случаях сварки цветных металлов под флюсом, при сварке сталей малых толщин в углекислом газе, а также при электрокислородной и воздушно-дуговой резке.

Материал неплавящегося электрода не должен участвовать в формировании состава наплавленного металла или металла шва. Однако в ряде случаев такое влияние, обычно ухудшающее свойства шва, имеется и поэтому надо его максимально ограничивать.

Основной задачей неплавящихся электродов является обеспечение устойчивого горения дуги при минимальном их расходе.

В сварочной технике они обычно используются при процессах с зависимой дугой (второй электрод—обрабатываемое изделие), хотя имеет место их использование и в процессах с независимой дугой, когда оба электрода, между которыми горит дуга, неплавящиеся.

Естественно, что требованию малого расходования электрода будут отвечать материалы с высокой температурой плавления и кипения, большим теплосодержанием при температуре кипения и значительной скрытой теплотой испарения, а также материалы, характеризующиеся одновременно относительно малыми потерями в результате химических реакций с окружающей средой. Необ-



ходимость получения достаточно мощных сварочных дуг при удобном для манипулирования при сварке сечении электродов выдвигает требование достаточно высокой электропроводности материала такого электрода. Определенную роль в эффективности применения неплавящихся электродов играет и распределение падения напряжения в дуге при сварке различных металлов и сплавов. При этом уменьшение при электродного падения напряжения, зависящее от пары катод-анод, у неплавящегося электрода, желательно для уменьшения тепловложения в электрод, его нагрева и расходования. Так, в случае использования такого электрода в качестве катода полезно в его составе иметь составляющие, обеспечивающие уменьшение работы выхода электрода, а следовательно, и меньшее значение прикатодного падения напряжения.

Наибольшее распространение в качестве неплавящихся электродов в сварочной технике имеют электроды из углеродистых веществ и вольфрамовые.

Электроды из углеродистых веществ разделяются на угольные и графитовые. Углерод возгоняется при обычных давлениях в твердом состоянии, без плавления. Его температура кипения  $4500^{\circ}\text{K}$ .

Скрытая теплота испарения углерода достаточно большая —  $13\ 000\ \text{кал/моль}$  или  $10\ 800\ \text{кал/г}$ . Это обеспечивает малое расходование углерода от тепловложения дуги испарением. В связи с этим для уменьшения его потерь в основном является важным ограничением расходования электрода в результате его взаимодействия с окружающей средой, в частности с газообразным кислородом, приводящим при повышенных температурах к сгоранию углерода в  $\text{CO}$ .

Уменьшение разогрева электродов достигается либо увеличением их сечения (что имеет чисто практическое ограничение в сварочной технике, затрудняя действия оператора), либо улучшением электропроводности. Электроды из аморфного электро-технического углерода, называемые угольными, имеют большее удельное электрическое сопротивление, чем изготовленные из кристаллического углерода — графита. Сопоставление некоторых характеристик угольных и графитовых электродов приведено в табл. III.13.

Т а б л и ц а III.13

Некоторые характеристики угольных и графитовых электродов

Характеристика материала электрода	Угольные электроды	Графитовые электроды
Электрическое сопротивление в <i>ом</i> кубика с ребром в <i>1 см</i>	0,0032	0,0008
Температура начала окисления на воздухе в $^{\circ}\text{C}$	500	640

В результате совмещения приведенных в табл. III.13 характеристик плотность тока в графитовых электродах в сравнении с угольными может быть увеличена в два-три раза, т. е. для одинаковой силы тока могут применяться электроды меньшего диаметра (сечения).

Угольные и графитовые электроды в системе сварочного производства не изготавливаются, и сварщики являются просто их потребителями, поэтому сведения об их производстве даются весьма краткие.

Угольные электроды в СССР изготавливаются по следующему рецепту (в %):

Кокс из грозненской нефти . . . . .	38,8
Сажа № 3 . . . . .	15,4
Смола каменноугольная . . . . .	23,0
Электродный бой . . . . .	22,8

В качестве технологических операций применяются: дробление (для кусковых материалов) на дробилках и в шаровых мельницах, кальцирование (прокалка при 700—950° С), просев для получения необходимого гранулометрического состава сыпучих материалов, приготовление смолы (агломерата), дозировка по весу и смешивание при температуре 80—110° С, прессовка (формовка или прошивка), обжиг с температурой нагрева до 1400° С, механическая обработка и приемка по контролю качества.

Хорошо изготовленный и обожженный угольный электрод имеет правильную цилиндрическую форму, прямолинейную ось, гладкую поверхность матово-черного цвета без трещин и обладает значительной твердостью. На бумаге он не должен оставлять следа, а при легких ударах должен издавать чистый звук, близкий к металлическому. Угольный электрод не должен растрескиваться при нагревании до высокой температуры.

Для маломощных дуг, например для осветительных дуговых устройств, угольные электроды делаются полыми, с заполнением осевого канала (отверстия) фитилем — порошкообразной массой, предназначенной для улучшения стабильности дуги. Применение таких электродов для сварки вызывает ряд затруднений и заставляет ограничивать силу сварочного тока для определенного диаметра электрода.

Полезным является поверхностное меднение электродов, улучшающее их стойкость при повышенных плотностях тока.

Угольные электроды с одного конца (рабочего, дугового) обтачиваются на конус под углом 60—70°.

Графитовые электроды изготавливаются из угольных посредством дополнительной высокотемпературной обработки — графитизации.

Задача такой обработки сводится к перестройке относительно хаотического расположения атомов в аморфном углероде в строгую кристаллическую решетку графита с атомным строением в виде

правильных шестиугольников, с постоянными параметрами решетки — расстоянием между атомами в каждом таком слое и между слоями. Такая атомная структура позволяет, в частности, относительно легко сдвигать одну плоскость атомных шестиугольников по отношению к соседней, что используется в применении графита для снижения потерь при трении, позволяет его легко обрабатывать режущим инструментом, даже простыми ножами.

Графитизация осуществляется длительной выдержкой угольных стержней при 2500—2600° 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.

Графитовые электроды по химическому составу представляют собой почти чистый углерод. Они имеют серовато-черный цвет с металлическим отблеском, слегка пачкают (бумагу, руки), значительно более мягкие, чем угольные.

В ряде случаев в сварочном производстве в качестве графитовых электродов применяют стержни неправильных (прямоугольных, трапециевидных) сечений, вырезаемые ножовкой из остатков графитовых электродов больших диаметров, используемых в электрометаллургических печах. Концы таких стержней также затачиваются на конус.

Вольфрамовые электроды являются значительно более удобными для большинства сварочных целей. Они могут использоваться при меньших диаметрах, обеспечивая необходимую электропроводность и значительно большую механическую прочность, особенно при удобных малых сечениях (диаметрах):

Температура плавления наиболее тугоплавкого из металлов — вольфрама равна 3377° С (>3600° К), а температура его кипения — ~4700° С (~5000° К). Скрытая теплота плавления вольфрама 1160 кал/г. Вольфрам обладает довольно высокой теплопроводностью и электропроводностью. Зависимость некоторых теплофизических свойств вольфрама от температуры приведена на рис. III.32.

Вольфрамовые стержни изготавливаются из порошка. Вольфрам содержится в земной коре в количестве  $7 \cdot 10^{-3}\%$ , главным образом в виде минералов — комплексных соединений  $WO_3$  с  $CaO$ ,  $FeO$ ,

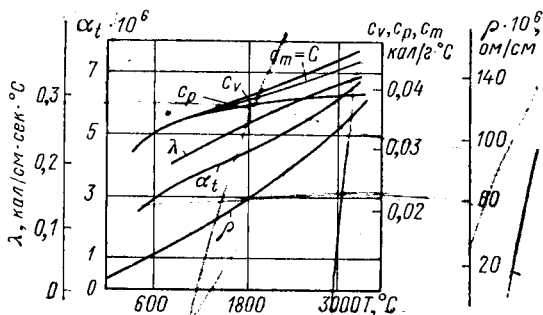


Рис. III.32. Зависимость теплофизических свойств вольфрама от температуры

~~Мног.~~ Их переработкой получают достаточно чистую трехокись  $WO_3$ , которая при обработке водородом при  $500-850^\circ C$  восстанавливается до порошкообразного вольфрама. Металлический вольфрам высокой чистоты (99,7%) получают и электролизом расплавов минералов с бурой при температуре  $1050-1300^\circ C$ . Порошковый вольфрам ~~затем~~ подвергается прессованию, спеканию и проковке, что приводит к значительному свариванию отдельных частиц. Такие заготовки для получения меньших диаметров проходят волочение, которое позволяет не только изготовлять стержни меньшего диаметра, но и проволоку диаметром до 0,01 мм.

Естественно, что при такой технологии качество металла стержней зависит от уплотнения. Влияние уплотнения при обработке на некоторые свойства вольфрама приведено в табл. III.14.

Т а б л и ц а III.14

Влияние уплотнения вольфрама при обработке на некоторые физические характеристики стержней

Диаметр вольфрамовых электродов $d$ в мм	Предельные отклонения по диаметру в мм	Плотность в $г/см^3$	Временное сопротивление разрыву в $кг/мм^2$	Удельное электрическое сопротивление в $ом \cdot м/мм^2$
4	3,94—4,05	18,7	52	0,060
3	2,96—3,05	19,2	80	0,056
2	1,94—2,09	19,2	106	0,052

Вольфрамовые электроды при сварке различных металлов используют как катод (при сварке на постоянном токе). В случае использования их в качестве анода они очень быстро расходуются (плавятся), в связи с чем сварка неплавящимся вольфрамовым электродом постоянным током обратной полярности практически не применяется. В некоторых случаях вольфрамовые электроды достаточно стойки и в дуге переменного тока.

Усиливается расходование электродов плавлением и вследствие образования на их торце более легкоплавких сплавов вольфрама с составляющими свариваемого металла. Эти составляющие могут попадать на торец электрода как в результате прямого контакта электрода со свариваемым изделием при коротких замыканиях во время зажигания дуги, так и в результате конденсации паров и попадания капель из сварочной ванны на торец электрода. Поэтому обычно стремятся исключить контакт электрода с изделием при зажигании дуги (зажиганием на дополнительной графитовой пластинке или наложением в момент зажигания на дуговой промежуток высокого напряжения большой частоты, вызывающего пробой без контакта) и стабилизировать дугу. Это требует наличия на электроде составляющих с малой работой выхода элект-

трода. Достаточно хорошие результаты при этом дает двуокись тория ( $\text{ThO}_2$ ), добавленная в количестве 1,5—2% в порошок вольфрама перед его прессованием. Такие торированные электроды (марки ВТ-15 по нормам НИО-021-612) значительно более стойки против оплавления торца (рис. III.33) и дают в швах меньшее количество вольфрамовых включений, получающихся при падении капель с электрода в ванну.

Однако торированные электроды в связи с естественной радиоактивностью тория требуют применения мер предосторожности. Работа с ними (хранение и сварка) должна производиться с ограничениями, определяемыми санитарными правилами использования радиоактивных веществ.

В последнее время разработаны лантанированные и иттрированные вольфрамовые электроды с 1,5—2,0%  $\text{LaO}$  или  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , обладающие очень хорошими качествами. Сопоставление осциллограмм напряжения дуги, снятых при сварке титанового сплава (рис. III.34), по данным инж. Г. И. Щербак, показывает, что наименьшие броски при зажигании дуги и наименьшее рабочее напряжение дуги в аргоне дают иттрированные электроды в сравнении с электродами из чистого и торированного вольфрама. По этим же материалам, потеря веса от количества повторных зажигания дуги у иттрированных электродов также меньше, чем у чистого вольфрамовых и торированных (рис. III.35). Также меньше они расходуются при длительном горении дуги на сопоставимых режимах.

Вольфрамовые электроды весьма чувствительны к окислению. Так, при наличии даже относительно небольших количеств кислорода в газовой фазе дуги на торце электрода образуется легкоплавкая окись, приводящая к плавлению металла электрода, появлению капли жидкого расплава значительных размеров и блужданию дуги по такой капле. При сварке меди даже примеси кислорода к техническому азоту приводят к очень сильному окислению вольфрама. Обычные примеси в аргоне, применяемом для сварки титановых, алюминиевых и магниевых сплавов, не оказывают заметного окисляющего действия на вольфрамовый электрод, естественно, при правильно подобранном диаметре по силе сварочного тока. Рекомендуемые пределы таких режимов приведены в табл. III.15 [47]. Расход вольфрамовых электродов, определяемый его потерями на испарение (частично и на плавление), характеризуется табл. III.16 [47].

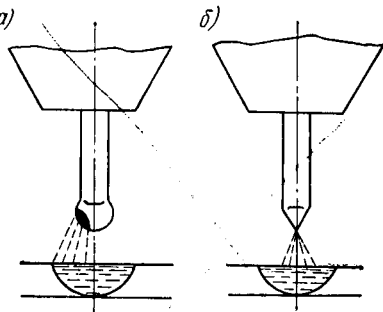


Рис. III.33. Состояние концов электродов при горении дуги в среде инертных газов: *а* — электроды из чистого вольфрама; *б* — электроды из торированного вольфрама

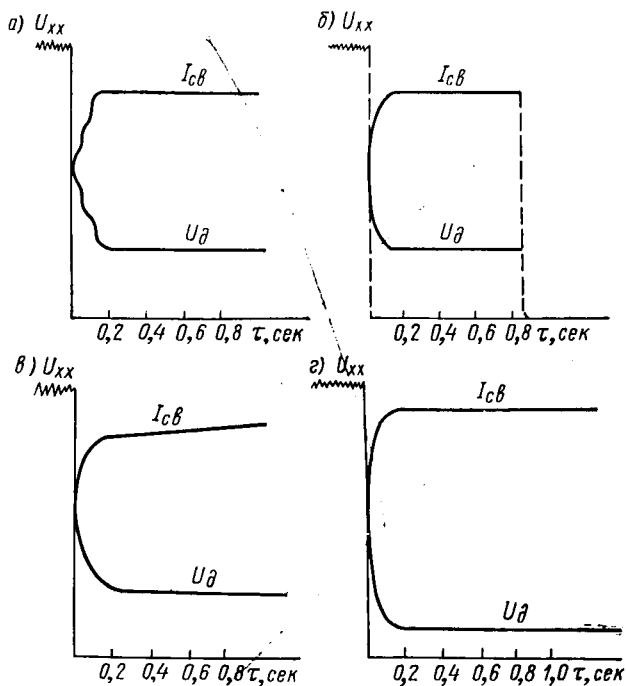


Рис. III.34. Осциллограммы тока и напряжения дуги после ее зажигания при сварке электродами: а — W; б — W + 1% Th; в — W + 1% Y; г — W + 3% Y

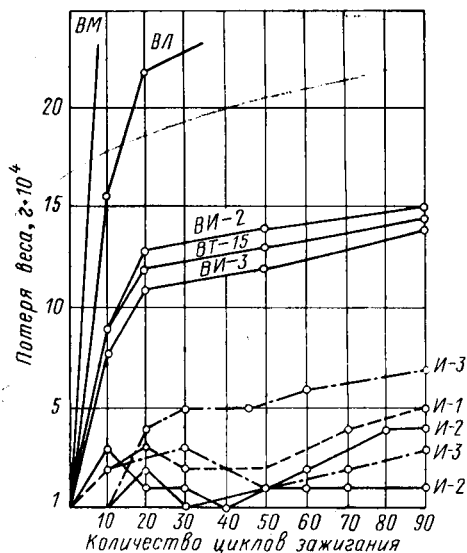


Рис. III.35. График зависимости расхода вольфрама от количества циклов зажигания дуги:

ВМ — чистый вольфрам; ВЛ — вольфрам лантанированный; ВТ-1,5 — вольфрам торированный; ВИ-2, ВИ-3 — вольфрам иттрированный Московского электролампового завода; И-1, И-2, И-3 — вольфрам иттрированный Черниковского завода (цифры — количество добавки к вольфраму, % вес.)

Т а б л и ц а III.15

Рекомендуемые пределы силы сварочного тока  
при сварке вольфрамовыми электродами в инертных газах

Род тока	Защит- ный газ	Сварочный ток в а при различных диаметрах электрода в мм				
		1—2	3	4	5	6
Переменный	Ar	20—100	100—160	140—220	200—280	250—300
	He	10—60	60—100	100—160	160—200	200—250
Постоянный пря- мой полярности	Ar	65—150	140—180	250—340	300—400	350—450
	He	50—110	100—200	200—300	250—350	300—400
Постоянный обрат- ной полярности	Ar	10—30	20—40	30—50	40—80	60—100
	He	10—20	15—30	30—40	30—70	40—80

Т а б л и ц а III.16

## Ориентировочные нормы расхода вольфрама при сварке

Свариваемые материалы	Толщина свариваемо- го металла в мм	Диаметр электрода в мм	Расход вольфрама на 100 м шва в г	
			Ручная сварка	Механизи- рованная сварка
Алюминиевые и маг- ниевые сплавы	1,0	1,5	8,3	3,9
	2,0	2,0	23,0	11,0
	4,0	3,6	88,0	39,0
	6,0	4,0	132,0	125,0
Конструкционные, нержавеющие и жаро- прочные стали	0,5	1,0	6,0	2,8
	1,0	1,5	8,0	3,9
	2,0	2,0	23,0	11,0
	4,0	4,0	132,0	125,0

При неудачных конструкциях горелок заметная доля расхода электродов, кроме естественного испарения и потерь плавлением, определяется их неиспользуемыми концами и случайными поломками при замене и при работе.

Попытки применения витых электродов из проволок малого диаметра положительного результата не дали. Они обладают слишком малой жесткостью, что не позволяет стабилизировать их положение в горелках.

При сварке некоторых металлов применение вольфрамовых электродов оказывается малоцелесообразным — дуга неустойчива, блуждает, плохо управляема. Такое положение фиксировалось, например, при аргонодуговой сварке тантала. При этом в качестве электрода наиболее целесообразным оказалось применение также тантала в виде стержней соответствующего диаметра [13]. При этом электрод расходовался мало, выступая, по существу, как неплавящийся.

Возможно, что применение танталовых электродов в качестве неплавящихся (температура плавления тантала  $\sim 3000^\circ\text{C}$ ) может быть целесообразно и при сварке других металлов, в частности в тех случаях, когда включения тантала в шве менее вредны, чем вольфрамовые.

### **§ III.8. Материалы электродов для машин электрической контактной сварки**

Электрическая контактная сварка является весьма высокопроизводительным процессом, при котором всякие потери времени на вспомогательные операции могут значительно снижать ее эффективность.

Для некоторых видов контактной сварки, в первую очередь точечной, заметные потери времени определяются недостаточной стойкостью электродов и необходимостью в связи с этим их частой заправки и замены.

Хотя материалы для электродов машин контактной сварки в ряде случаев обеспечиваются для сварочного производства внешней поставкой, предприятия, применяющие контактную сварку в большом объеме, часто сами производят такие материалы. Поэтому работникам сварочного производства следует в общих чертах быть знакомыми с влиянием технологии изготовления этих материалов на характеристики, определяющие их эксплуатационные свойства.

Рассмотрим некоторые требования к материалам электродов контактных машин.

Машины, предназначенные для стыковой и рельефной сварки, характеризуются такой конструкцией электродов, при которой площадь контакта между электродом и свариваемым изделием может быть развита и может превышать площадь места сварки, определяемого размерами изделия. В этих случаях плотность тока в контакте электрод—изделие будет меньше, чем в сечении, подлежащем сварке. Эту группу электродов условно можно характеризовать как работающую при малой плотности тока.

Во вторую группу входят электроды, эксплуатируемые при высокой плотности тока, примерно равной плотности тока в месте сварки, но предназначенные для сваривания металлов с невысокой электропроводностью. Например, при точечной (роликовой) сварке площади контакта электрод—деталь и деталь—деталь



примерно одинаковы. Сопоставимы и их контактные сопротивления. Для получения расплавления в контакте деталь—деталь при ограничении разогрева электрода вблизи его контакта с деталью необходим интенсивный отвод тепла в электрод (что достигается выбором конструкции электрода и отводом тепла проточной водой, а также применением материала электрода с высокой теплопроводностью) и уменьшение в нем тепловыделения (т. е. уменьшение его электрического сопротивления, достигаемое применением материала электрода с высокой удельной электропроводностью). В этом случае тепловыделение в свариваемых деталях из металла с заметно меньшей электропроводностью будет значительно большее, чем в приконтактных зонах электрода.

Так как у металлов электропроводность и теплопроводность практически пропорциональны, то подбор материала по электропроводности обеспечивает и интенсивность отвода тепла по телу электрода.

Третья группа включает электроды, также эксплуатируемые при высокой плотности тока, но предназначенные для сварки деталей из металла с низким удельным электросопротивлением. Такие условия эксплуатации электродов являются наиболее жесткими.

Отсюда, на основании накопленного практического опыта, можно сформулировать требования к материалам электродов для контактных машин по электропроводности (удельному электрическому сопротивлению) и твердости.

Для первой группы: твердость в условиях эксплуатации  $HВ$  180—225; удельное сопротивление  $\rho \leq 2 \div 2,5\rho_{Cu}^*$  (т. е. не более чем в 2—2,5 раза больше удельного сопротивления меди, принятой за единицу сравнения)\*.

Для второй группы: твердость сопоставима с твердостью свариваемого металла (например, малоуглеродистой стали), но не менее  $\sim 90HВ$ ; удельное сопротивление  $\rho \leq 1,4\rho_{Cu}$ .

Для третьей группы: удельное сопротивление  $\rho \approx \rho_{Cu}$ , однако возможно использование и других материалов, в частности с высокой температурой плавления (вольфрам или молибден), применяемых в виде вставок в медные наконечники.

В течение длительного периода, да и в настоящее время, в ряде случаев для изготовления электродов точечных и роликовых машин применяется холоднотянутая технически чистая медь. Характеристики этого материала даны в табл. III.17. Обращает на себя внимание достаточно низкая температура рекристаллизации такого металла — около  $200^\circ C$  (рис. III.36). При интенсивном процессе сварки приконтактные области электрода нагреваются до такой и более высокой температуры, падает твердость,

---

\* Обычно требования к материалам электродов даются не в значениях удельных сопротивлений, а в относительной электропроводности от электропроводности чистой меди.

Сравнительные свойства некоторых материалов для электродов контактных машин

Материал	Химический состав в %					Удельная электропроводность в % к меди	Твердость НВ	Температура рекристаллизации в °С
	Cu	W	Cd	Cr	Zr			
Медь М-1, озоженная	99,9	—	—	—	—	100	40	—
Медь М-1, твердотянутая	99,9	—	—	—	—	98	80—90	200
Кадмиевая бронза	Остальное	—	1—1,2	—	—	80—90	100—120	250
Сплав ЭВ		—	—	0,4—0,8	—	0,3—0,6	75—80	120—140
Бронза Бр-Х	—	—	—	—	—	80—85	120—140	420
.Кириг А	40—45	60—55	—	—	—	45	225	—

\* В прутках Cr = 0,4—0,7%, в плитах (для электродов роликовых машин) Cr = 0,4—1,0%.

происходит смятие контактной поверхности электрода ион требует заточки.

Повышение твердости и температуры рекристаллизации возможно легированием меди. Однако легирование меди почти всеми элементами значительно снижает электропроводность (и, соответственно, теплопроводность). Влияние различных легирующих на изменение электропроводности, взятой в долях от электропроводности технической чистой меди, приведено на рис. III.37.

Из рис. III.37 следует, что из практически применяемых легирующих элементов меньше всего снижают электропроводность меди кадмий, цинк и хром. Даже 0,1—0,2% железа, кремния и фосфора снижают электропроводность меди в 2—3 раза.

Получение сплавов с удовлетворительной электропроводностью и повышенной твердостью осуществляется путем применения: ненасыщенных твердых растворов (например, медь с ~ 1,2% Cd); пересыщенных растворов с выпадением дисперсных выделений после сложной термической обработки — закалки и теплового старения, приводящей к дисперсионному твердению. Мелкие дисперсные включения, повышая твердость, мало влияют на снижение электропроводности.

На базе этих представлений разработан ряд составов медных сплавов, также приведенных в табл. III.17. У кадмиевой бронзы температура рекристаллизации несколько выше, чем у меди. Еще более высокая температура рекристаллизации и твердость у тройного сплава Cu—Zn—Cr, хотя его электропроводность несколько ниже.

Особым материалом для электродов точечных машин является кирит А, изготавливаемый методом прессования и спекания порошков меди и вольфрама. Однако его электропроводность заметно ниже, чем у других сравниваемых материалов.

Повышение стойкости электродов точечных машин при переходе от меди к ее сплавам обычно оценивается по количеству свариваемых точек в интенсивном режиме, при котором диаметр торца электрода увеличивается до таких размеров, при которых нужна его заточка (обычно на 20%). Такая зависимость для сварки углеродистой стали приведена на рис. III.38. Как следует из этих экспериментальных данных, замена меди кадмиевой бронзой дает увеличение стойкости в 2—2,5 раза, а замена тройным сплавом — в 3—5 раз.

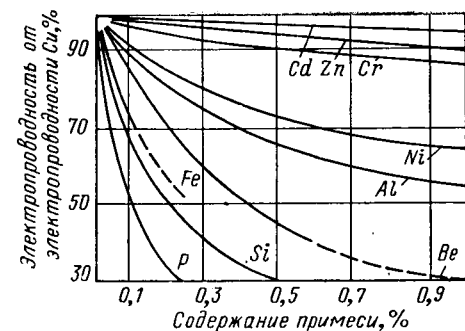


Рис. III.37. Влияние примесей на электропроводность медных сплавов

Тройной сплав изготавливают из достаточно чистых исходных материалов. Вначале в пламенной печи, в графитовом тигле расплавляют кусковую медь марки М-1. Плавка осуществляется под слоем графита. После расплавления медь вначале раскисляют электролитическим цинком марки Ц-1, введя его в количестве 0,1% от веса меди. Затем в 3—4 приема (чтобы не всплывал и не окислялся) вводят хром марки Х-1 или лигатуру, заранее изготовленную из 90% Cu и 10% Cr. Расплав нагревают до 1200—

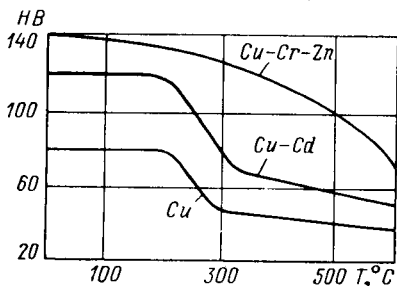


Рис. III.36. Характер изменения твердости холоднотянутой меди, кадмиевой бронзы и тройного сплава от температуры нагрева

1250° С и выдерживают 15—20 мин. Затем тигель извлекают из печи (горна) и добавляют цинк Ц-1 в количестве 0,6—0,7% от веса меди. Расплав энергично перемешивают и разливают в очищенные чугунные конические изложницы, подогретые до ~100° С.

Слиток после извлечения из изложницы подвергают пластической обработке давлением: либо прессуют при 850—900° С, либо нагревают до 800—850° С и проковывают при температуре 600° С до 100% вытяжки.

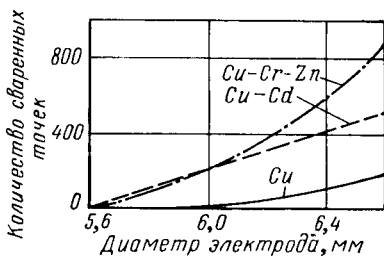


Рис. III.38. Изменение диаметра электрода точечной машины в зависимости от материала электрода и количества поставленных точек

Такие заготовки подвергают термической обработке. После нагрева до 925° С и выдержки ~1 ч они закаляются в холодной воде, в результате чего электропроводность сплава становится равной ~50% от электропроводности меди и твердость *HВ* 50—60. Отпуск осуществляется ступенчатый: сперва 525° С с выдержкой 1 ч, затем снижение температуры до 325° С в течение 2 ч и после выдержки при 325° С в течение 12 ч охлаждение на воздухе. После такого отпуска сплав характеризуется электропроводностью ~80% электропроводности меди и твердостью *HВ* 90—110. После травления в 10—15%-ном растворе серной кислоты (для удаления с поверхности образовавшихся окислов) осуществляется холодная прокатка или волочение с вытяжкой 40—50%. Вот в этом конечном состоянии при такой же примерно удельной электропроводности твердость сплава увеличивается до *HВ* 120—140.

Для губок стыковых машин может применяться такой же сплав, хотя в ряде случаев используются и алюминиевые бронзы (12% Al, 4% Fe, остальное — медь), или кремне-никелевые бронзы.

### § III.9. Припой для пайки

Изготовление различных изделий посредством пайки по технологии в ряде случаев значительно отличается от производства сварных. Однако обычно по организационной структуре предприятий техническое руководство сваркой и пайкой находится в одних подразделениях. В связи с тем, что по сущности получения паяные соединения нужно рассматривать как частный случай сварных [46], припои для выполнения пайки также являются сварочными материалами.

Припоем называется металл (обычно сплав), заполняющий в жидком состоянии в процессе пайки зазор между кромками (поверхностями) паяемых изделий и образующий после охлаждения соединения, характеризующиеся установлением металлических связей затвердевшего припоя с контактировавшими с ним спаиваемыми

мыми металлами (однородными или разнородными). Процесс пайки сопровождается диффузионными процессами в системе припой—паяемый металл и, как правило, приводит к появлению промежуточных слоев в виде твердых растворов или химических соединений составляющих припоя и паяемого металла.

Процесс пайки осуществляется при температурах ниже температуры паяемого металла, но, как правило, несколько превышающих температуру ликвидус припоя. Поэтому весьма важной характеристикой припоя является его температура ликвидус и температурный интервал ликвидус—солидус. В связи с тем, что паять приходится весьма разнообразные металлы с различными температурами плавления, то и диапазон температур плавления припоев должен быть достаточно широким. Учитывая и необходимость получения в месте спая твердых растворов или химических соединений, обеспечивающих необходимые свойства паяного соединения, составляющие припоев для пайки различных металлов не могут быть одинаковыми. Поэтому для пайки широкого ассортимента различных металлов и особенностей эксплуатационных условий работы паяных соединений (температура, возможность коррозии, требуемая прочность и пр.) составов припоев, применяемых в промышленности, весьма много.

Обычно технологически припой разделяют на мягкие (с условно принятой температурой плавления  $T_{пл} < 450^\circ \text{C}$ ) и твердые (с  $T_{пл} > 450^\circ \text{C}$ ), хотя такая классификация и не очень точна. Удобна их классификация и по базовому металлу, являющемуся основой припоя. При этом припой на различной базе, как правило, пригодны не для всех металлов и их применение связывается с конкретными металлами и сплавами.

К мягким припоям относятся [37] сплавы на базе галлия, висмута, индия, олова и свинца, кадмия, цинка. Твердые припои применяются на базе алюминия, серебра, меди, золота, никеля и других металлов.

Наиболее распространенными являются припои, представляющие собой сплавы с добавкой к основе элементов, снижающих температуру плавления в связи с образованием достаточного количества легкоплавких эвтектик. Иногда добавляются элементы и повышающие температуры плавления сплава.

На рис. III.39 в виде диаграммы показаны интервалы температур плавления припоев на различной базе с наиболее обычными добавками, обеспечивающими получение сплавов с указанными интервалами температур плавления.

Припой на базе галлия ( $\text{Ga}$ ,  $T_{пл} = 29,8^\circ \text{C}$ ) получают посредством добавления к жидкой основе дисперсных порошков (в основном меди, никеля, иногда с добавкой олова, серебра и др.) и предварительного создания достаточно равномерной пасты. Пайка осуществляется при температурах  $\sim 50^\circ \text{C}$ , при которых происходит взаимодействие галлия и с порошками, введенными в припой, и с поверхностями спаиваемых деталей с образованием

сплавов с более высокой температурой плавления. В дальнейшем как при комнатной температуре, так и посредством дополнительной термической обработки при ограниченных температурах (более 70° С) происходит дальнейшее обогащение галлия соответствующими элементами порошков и основного металла, и температура распая растет до 200° С и более высоких [12, 63, 65]. Эти припои используются для пайки цветных металлов с покрытиями (например, гальваническими), главным образом деталей, к соединениям которых предъявляются требования достаточной теплостойкости, но которые нельзя нагревать до высоких температур в процессе пайки.

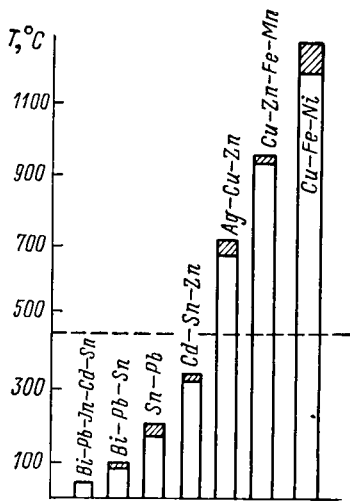


Рис. III.39. Диаграмма температур плавления наиболее распространенных групп припоев:

заштрихованная часть — область температур плавления

В и с м у т (Bi,  $T_{пл} = 271^\circ \text{С}$ ) дает легкоплавкие эвтектики с целым рядом элементов. Наиболее легкоплавкая эвтектика ( $T_{пл} = 46,7^\circ \text{С}$ ) получается в его сплаве с кадмием, свинцом, оловом и индием. Вообще припои на базе висмута с различными добавками имеют температуру плавления (или ликвидус, для неэвтектических составов) от 46,7 до 140° С (табл. III.18). Для припоев на базе висмута характерно отсутствие усадки при охлаждении и даже некоторый «рост».

Сплавы и н д и я (In,  $T_{пл} = 156,4^\circ \text{С}$ ) с кремнием, оловом, цинком дают эвтектики с наинизшей температурой плавления — около 90° С. Припой состава 52% In, 48% Sn ( $T_{пл} = 117^\circ \text{С}$ ) смачивает стекло и, сцепляясь с ним, позволяет осуществлять пайку металлов с другими неметаллическими материалами.

К а д м и й (Cd,  $T_{пл} \approx 321^\circ \text{С}$ ) также в виде сплавов в основном с цинком, оловом, свинцом и серебром является основой некоторых мягких припоев для пайки в пределах температур ~150—440° С.

Составы некоторых припоев на базе галлия, висмута, индия и кадмия приведены в табл. III.18.

Наиболее распространенными для пайки ряда металлов и сплавов являются оловянно-свинцовые припои. Иногда для увеличения их прочности к ним добавляют сурьму в количестве не более 7% в связи с ее охрупчивающим действием.

Ряд оловянно-свинцовых припоев в СССР гостированы (ГОСТ 1499—54). Их составы и некоторые дополнительные характеристики приведены в табл. III.19 [37].

Некоторые характеристики припоев на базе Ga, Bi, T и Cd

Состав припоев в % вес										Температура в °С	
Ga	Cu	Ni	Ag	Bi	Cd	Sn	Pb	In	Zn	ликвидус (плавление эвтектик)	солидус
65	35	—	—	—	—	—	—	—	—	*	—
55	—	45	—	—	—	—	—	—	—	*	—
65	31	—	4	—	—	—	—	—	—	*	—
34	66	—	—	—	—	—	—	—	—	*	—
60	30	—	—	—	—	—	—	10,0	—	*	—
—	—	—	—	44,3	5,3	8,3	22,6	19,5	—	46,7	—
—	—	—	—	49,5	10,1	13,1	27,3	—	—	71	—
—	—	—	—	52	—	16	32	—	—	95	—
—	—	—	—	56	—	40	—	—	4	130	—
—	—	—	—	60	40	—	—	—	—	144	—
—	—	—	—	50	—	19	31	—	—	100	95
—	—	—	—	50	—	25	25	—	—	125	90
—	—	—	—	42	16	—	42	—	—	130	91
—	—	—	—	—	13,6	41,4	—	44,2	0,8	90	—
—	—	—	—	—	—	46	—	52,2	1,8	108	—
—	—	—	—	—	—	48	—	52	—	117	—
—	—	—	—	—	—	—	—	98	2	142	—
—	—	—	—	—	82,6	—	—	—	17,4	266	—
—	—	—	—	—	50	30	—	—	20	277	157
—	—	—	5	—	79	—	—	—	16	285	270
—	—	—	—	—	60	10	—	—	30	332	—

\* Изготавливается в виде пасты при температуре 45—50° С. В результате происходящего взаимодействия температура плавления сильно изменяется.

Различные оловянно-свинцовые припои рекомендуются для применения в зависимости от их свойств. Например, ПОС-90 — для пайки внутренних поверхностей пищевой посуды и медицинской аппаратуры; ПОС-40 — для пайки латуни, железа и медных проводов; ПОСС-4—6 — для лужения, выравнивания вмятин в кузовах автомобилей и пайки белой жести, железа, меди, латуни, свинца при наличии замковых швов.

Составы и некоторые характеристики оловянно-свинцовых припоев

Марка припоя	Состав в % вес.						Температура в °С		Предел прочности при растяжении в кг/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение в %	Жидкотекучесть (отливка в песок) в см	Капиллярность в мм
	Sn	Pb	Sb	Примеси * не более			ликвидус	солидус				
				Cu	Bi	As						
ПОС-90	89—90	Остальное	≤ 0,15	0,08	0,1	0,05	222	183	4,3	25	135	—
ПОС-61	59—61	То же	≤ 0,8	0,1	0,1	0,1	203	183	—	—	115	—
ПОС-50	49—50	»	≤ 0,8	0,1	0,1	0,1	209	183	3,6	32	91	23,8
ПОС-40	39—40	»	1,5—2	0,1	0,1	0,05	235	183	3,2	63	63	23,8
ПОС-30	29—30	»	1,5—2	0,15	0,1	0,05	256	183	3,3	58	63	25,4
ПОС-18	17—18	»	2—2,5	0,15	0,1	0,05	277	183	2,8	67	60	14
ПОСС-4—6	3—4	»	5—6	0,15	0,1	0,05	265	245	5,9	24	—	—

\* Fe и S допускаются в количестве ≤ 0,02%; Zn и Al — до 0,002%; Ni в припоях ПОС-90, ПОС-61, ПОС-50 — до 0,02%, в остальных — до 0,08%.

Цинк (Zn,  $T_{пл} = 419^\circ\text{C}$ ) со многими элементами образует эвтектики. На основе цинка ( $\geq 6\%$ ) разработан ряд припоев для пайки алюминия, меди и некоторых их сплавов. Например, для пайки алюминия используется припой на базе цинка с добавками меди ( $\leq 5\%$ ) и алюминия ( $\leq 7\%$ ), иногда, для повышения их сопротивляемости коррозии во влажной атмосфере, с добавками олова и свинца (соответственно до  $\text{Sn} \leq 0,5\%$  и  $\text{Pb} \leq 1,5\%$ ) [37]. Эта группа припоев на базе цинка продолжает разрабатываться.

Из припоев на основе алюминия для пайки алюминия и его сплавов наибольшее распространение имеет твердый ( $T_{пл} \approx 525^\circ\text{C}$ ) припой марки 34А (25—30% Cu, 4—7% Si, Al — остальное), близкий по составу к эвтектике в системе Al—CuAl<sub>2</sub>—Si. Иногда к этой системе добавляют кадмий и цинк, реже — марганец и олово, что позволяет в значительных пределах варьировать их температуры плавления.

Наиболее универсальными являются припои на базе серебра (Ag,  $T_{пл} = 960^\circ\text{C}$ ) — серебряные припои. С теми или иными добавками они применяются для пайки сплавов на железной основе, в частности высоколеги-



рованных сталей со значительным содержанием хрома, медных сплавов и сплавов титана. В этих случаях к серебру добавляют различные активные добавки (литий и др.). Наиболее распространены серебряные припои тройной системы Ag—Cu—Zn, которые в СССР гостированы (ГОСТ 8190—56). В табл. III.20 приведены некоторые характеристики этих припоев.

Т а б л и ц а III.20

Некоторые характеристики серебряных припоев

Марка припоя	Состав в % вес.			Примеси (не более)		Температура в °С		Предел прочности в кг/мм <sup>2</sup>	Электропроводность (в % от электропроводности меди)
	Ag	Cu	Zn	Pb	Все-го	ликвидус	солидус		
ПСр-10	10±0,3	50±1	Остальное	0,5	1	850	810	—	6,5
ПСр-12	12±0,3	36±1	То же	0,5	1	800	750	18,5	11,1
ПСр-25	25±0,3	40±1	»	0,5	1	775	745	28	6,9
ПСр-45	45±0,3	30±0,5	»	0,3	0,5	725	600	30	9,7
ПСр-65	65±0,5	20±0,3	»	0,3	0,5	720	685	~33	8,6
ПСр-70	70±0,5	26±0,5	»	0,3	0,5	755	730	~33	4,2

Различные припои этой группы также имеют наиболее рекомендованные области их применения как по составам спаиваемых металлов, так и различным дополнительным требованиям к паяным соединениям.

Кроме гостированных серебряных припоев, есть ряд припоев с участием серебра для различных специальных назначений. В качестве примеров можно привести припой для пайки меди и ее сплавов, содержащий серебро, медь и фосфор (5—7%) и имеющий температуру плавления ~650° С.

Относительно широко применяются припои на основе меди. Медь ( $T_{пл} = 1083^{\circ} \text{С}$ ) сама используется при пайке некоторых сплавов на железной основе в качестве припоя. Больше применяются в качестве припоев медно-цинковые и медно-фосфористые сплавы. Ряд этих сплавов гостированы в виде различных марок припоев (ПМц-36, ПМц-48, ПМц-54), однако все они имеют малую пластичность и используются относительно редко, главным образом для пайки меди и сплавов на ее основе. Более распространенными как припои являются некоторые марки латуней (Л62, Л68) с содержанием меди соответственно 60,5—63,5 и 67—70% вес.

При регламентированном количестве примесей, в основном свинца и железа, около 0,2%. Улучшение технологических свойств латуней, в частности, при их применении в качестве припоев, может быть достигнуто дополнительным их легированием оловом и кремнием. В качестве таких припоев в СССР применяются ЛОК59-1—0,3 и ЛОК62-06—04, предложенные Г. А. Асиновской (ВНИИавтогенмаш). Эти припои имеют температуру плавления несколько выше 900° С.

Большее снижение температуры плавления по сравнению с медью имеют припои в системе Cu—P. Эвтектика (при 8,25% P) имеет температуру плавления 707° С. Обычно медно-фосфористые припои содержат от 4 до ~8,5% P. Они применяются в основном для пайки сплавов на медной основе, так как со сплавами на базе железа имеющийся в припоях фосфор дает хрупкие прослойки в паяных швах.

Применяются в качестве припоев и более сложные сплавы на основе меди с добавками цинка и марганца (до ~20%), а также цинка, никеля и кремния, а также более сложные. В частности, для припайки быстрорежущей стали и твердых сплавов к державкам из машиноподелочной стали применяются припои ГПФ и ГФК, характеристики которых даны в табл. III.21.

Т а б л и ц а III.21

Припои для пайки пластин из быстрорежущей стали с державками

Марка припоя	Состав припоя в % вес.						Температура в °С	
	Cu	Zn	Fe	Ni	Mn	Si	ликвидус	солидус
ГПФ	66—72	—	12—14	10—14	4—5	1—1,8	1280	1190
ГФК	62—71	6—8	5—7	4—5	5—6	3—4	955	935

Для ряда случаев (ювелирные изделия, вакуумная аппаратура) применяются припои, содержащие значительные количества (~30—75%) золота. В качестве добавок к золоту обычно используются серебро, медь, палладий и цинк. Температура ликвидус для большинства таких припоев изменяется в пределах 750—1000° С [37].

Еще более высокотемпературные припои применяются на базе никеля и железа. Эти припои, главным образом на базе никеля, применяются для пайки жаропрочных сталей и металлов с высокой температурой плавления. Обычными добавками к этим припоям являются марганец, хром, кремний и бор.

Припои различных составов применяются либо в виде сплошных металлических отливок (стержни, пластинки), пластически деформированными (проволока, лента, фольга и пр.), а также в виде зерен (типа дроби) и порошков — для хрупких и не под-

дающихся деформированию сплавов. В некоторых случаях припои изготавливаются составными (пруток с различным составом центральной части и периферии, многослойные листы, фольга и др.).

В связи с тем, что кроме предварительной очистки паяемых поверхностей и в процессе пайки необходимо удалять различные загрязнения (в основном окислы), которые могут появиться в период нагрева до температуры пайки, необходимо обеспечивать очистку их до взаимодействия с припоем. Для этого при пайке применяются, как правило, флюсы твердые (с температурой плавления меньшей, чем температура плавления припоя), жидкие и газообразные. В ряде случаев флюсы вводят вместе с припоями.

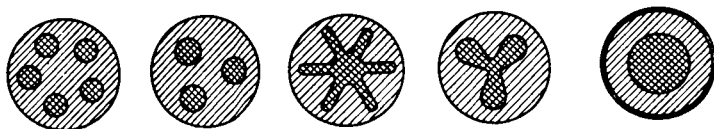


Рис. III.40. Формы сечения трубчатых припоев

Так, при порошкообразных припоях вводят и порошкообразный флюс в виде общей смеси. Иногда изготавливаются и прутки сложной формы, в которых по длине равномерно распределен металлический припой и неметаллические составляющие твердого флюса. Некоторые формы сечений таких припоев приведены на рис. III.40.

Весьма удобна во многих случаях пайка самофлюсующими припоями. В этом случае составляющая припоя, активно взаимодействуя с металлом по паяемой поверхности (кромке), очищает ее от окислов. В частности, такие характеристики имеют припои, содержащие литий (обычно в количествах до 2%), фосфор (в медно-фосфористых припоях), бор и некоторые другие составляющие флюсов. Пайка самофлюсующими припоями обычно удобнее, чем не самофлюсующими, является технологически более гибкой, позволяет достигать большей производительности.

Как правило, стандартные припои поставляются централизованно. Некоторые специальные припои потребители изготавливают непосредственно на своем производстве.

## НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

**§ IV.1. Общие сведения о применении  
неметаллических сварочных материалов**

Ранее отмечалось, что в условиях сварки металл в результате взаимодействия с окружающей материальной средой может поглощать нежелательные элементы, ухудшать свой состав и свойства. Так, например, при выполнении сварки в обычной воздушной атмосфере без специальной защиты металла от ее воздействия происходят процессы окисления и азотирования. Для некоторых металлов, в частности сталей, наиболее значительными в этих условиях являются окисление и азотирование жидкого металла — капель расплавленного добавочного металла или сварочной ванны. При сварке других металлов, например титановых сплавов, опасно взаимодействие с кислородом, азотом (и некоторыми другими элементами и соединениями) не только жидкого, расплавленного металла, но также и твердого, нагретого ниже температуры плавления.

В связи с этим надо предохранять при сварке от воздействия воздуха (или других «вредных» газовых фаз) либо только расплавленный металл, либо и расплавленный, и твердый, нагретый до достаточно высоких температур. Идеальной защитой при этом было бы удаление из зон, где имеется расплавленный или твердый, но достаточно нагретый металл, таких веществ, которые, реагируя с металлом, могли бы его ухудшать. Такой идеальной защиты, как правило, создать при сварке не удается. Однако воздействие окружающей металл материальной среды можно свести к минимуму, к пределам, которые практически будут незаметны, малозначимы. Такую материальную среду в реакционном сварочном пространстве можно будет считать практически пассивной, инертной. Она будет создавать необходимую защиту металла при сварке от ухудшения. Среда, осуществляющая такую защиту от воздействия воздуха, может быть либо газовая, либо жидкостная.

Возможен и другой вариант получения металла необходимого состава и свойств. Например, ухудшенный вредными примесями металл может быть очищен от них дополнительной обработкой. В металлургии для такой обработки используются жидкие не-

металлические расплавы — шлаки. Широко они применяются и в сварочных процессах.

Таким образом, если газовая фаза какого-то определенного состава может служить средством превентивной защиты металла от вредного воздействия в основном составляющих воздуха, то жидкие шлаки могут не только выполнять эту роль, но и обрабатывать металл в желаемом направлении.

Защита от кислорода и азота воздуха может быть осуществлена путем почти полного его удаления (до состояния достаточно высокого вакуума, например, при электроннолучевой сварке) либо путем оттеснения воздуха от реакционного сварочного пространства другими газами. Это обычно достигается направлением в зону сварки так называемых защитных газов. Если сварка выполняется в естественных условиях, при окружении воздуха, такое его оттеснение осуществляется направленной, достаточно мощной струей защитного газа. Эта струйная защита кроме требований к самому защитному газу должна отвечать еще и некоторым общим требованиям, таким как отсутствие замешивания внешней газовой среды в струю, достаточное оттеснение окружающего газа. Если химическая активность и возможность реагирования с расплавленным металлом определяются составом защитного газа, то надежность струйной защиты определяется рядом дугих параметров (сечение струи, начальная скорость истечения газа, его плотность и др.).

Струйная защита применяется при сварке с использованием так называемых инертных газов, а также активных, явно реагирующих с металлом. Она применяется и при ручных, и при механизированных способах дуговой сварки.

Другим видом газовой защиты при сварке является использование камер с контролируемой атмосферой. В этом случае из некоторого объема вокруг сварочного пространства (обычно в специальной камере, в которую вводится свариваемое изделие и весь необходимый для сварки инструмент) удаляется воздух до создания необходимого вакуума, а затем этот объем заполняется газом или газовыми смесями такого состава, который удовлетворяет требованиям получения металла в сварных соединениях необходимого состава и свойств. И в этом случае сварка осуществляется сварочной дугой при неплавящемся или плавящемся электроде.

Как при струйной защите, так и при сварке в камерах с защитной атмосферой применяются практически не реагирующие с металлом инертные газы — технический аргон, гелий и их смеси. Для меди и ряда сплавов на медной основе таким практически инертным газом является достаточно очищенный азот, а для молибдена — водород. Возможны и другие комбинации газов и их смесей.

Однако достаточно большие расходы таких газов, особенно при струйной защите, при их дефицитности и достаточно высокой стоимости ограничивают их широкое применение.

При сварке ряда металлов применение таких газов не обязательно, а иногда (например, для кипящих малоуглеродистых сталей) может даже создавать трудности в получении швов необходимого качества. Однако использование в этих случаях так называемых активных газов вполне оправдано и по техническим, и по экономическим соображениям. Наиболее широко в качестве активного защитного газа в сварочной технике применяется углекислый газ, иногда в виде смесей с добавлением аргона или даже кислорода. Сварка в углекислом газе, впервые предложенная в СССР [44], получила широкое применение и у нас, и за границей. Обычным методом использования таких защитных газов является струйная защита.

Значительно меньшее применение получила сварка с использованием в виде защитного газа паров воды.

В некоторых случаях в качестве материалов, создающих газовую фазу с необходимыми, с точки зрения металлургического процесса обработки металла при сварке, характеристиками, их воздействие определяет и тепловой режим сварочной операции. Примерами такого использования являются горючие смеси при газовой сварке плавлением и пайке, газопрессовой сварке и при других пламенных методах обработки металлов. Эти горючие смеси получаются из тех или иных горючих газов и обычно кислорода. Наиболее универсальным из применяемых в сварочном производстве горючих газов является ацетилен, хотя в ряде случаев используются и различные его заменители: пропанобутановые смеси, природные газы, метан, водород и др.

Кислород как газ, применяемый в сварочном производстве, имеет самостоятельное значение. Он обеспечивает создание теплоэффективного пламени для сварки плавлением, давлением и при пайке; он используется в качестве добавок к защитным газам при дуговой сварке; им определяются процессы кислородной резки металлов.

Таким образом, в сварочной технике применяется много различных газов и их смесей.

Однако значительно шире в сварочном производстве применяются различные шлаки.

Они используются и в целях защиты от влияния воздуха при автоматической и полуавтоматической дуговой сварке под слоем флюса различных металлов и сплавов, при электрошлаковой сварке, а также при ряде других способов сварки и наплавки, как при независимом источнике тепловой энергии для сварки и пайки (газопламенная сварка и пайка, дуговая сварка и наплавка неплавящимся электродом и др.), так и при дуговой сварке зависимой дугой (сварка плавящимся электродом).

Как уже указывалось, шлаки могут быть при этом пассивными и активными, т. е. улучшающими состав металла, а в ряде случаев его структуру и свойства. Шлаки при дуговой сварке плавящимся электродом, получаемые при расплавлении электрода и главным

образом его покрытия, в целом рассмотрены ранее. Для этого случая характерно примерно постоянное соотношение количеств металла и обрабатывающего его шлака.

В случае использования гранулированных порошкообразных флюсов при дуговой сварке расплавляемые частицы создают шлаковый купол над реакционной зоной дуги, заполненный газами. Процессы взаимодействия в этом случае происходят в системе металл—шлак—газ. При этом в зоне наиболее высоких температур газовый пузырь значительно влияет на процессы взаимодействия, а в хвостовой части ванны он отсутствует и шлак непосредственно контактирует с металлом.

При электрошлаковой сварке (и электрошлаковом переплаве) шлак взаимодействует с расплавленным металлом практически без участия газовой фазы.

Аналогичное положение имеет место и при газовой сварке и пайке с вводимыми в сварочную зону флюсами — шлаками.

Кроме защиты от воздуха сварочные шлаки осуществляют ряд задач по освобождению расплавленного металла от различных вредных примесей. К этим их функциям относится не только освобождение металла от растворенных и выделенных в нем в виде самостоятельной фазы окислов, но также удаление из металла других вредных примесей (в железных сплавах серы, фосфора, в никелевых — серы и др.). Для этого в каждом конкретном случае составы шлаков должны иметь определенную композицию (см. гл. II.5).

Как правило, в сварочных процессах шлаки получают путем расплавления либо смесей порошков, либо частиц, которые представляют собой конгломераты различных составляющих, скрепленных между собой связующими. Величина порошкообразных частиц определяется условиями обеспечения их достаточного расплавления при локальном тепловом действии сварочного источника тепла. При этом приходится учитывать и их технологические характеристики — удобство подачи необходимого количества флюса в нужное место, обеспечение его требуемого количества для обработки металла, степень уплотнения слоя порошков, влияющую на процессы сварки, и пр.

Необходимость сварки различных металлов, а следовательно, и обработки жидкого металла разных составов, зависимость технологических характеристик не только от химического состава флюсов — шлаков, но и от их физического состояния определяют большое количество флюсов, используемых в сварочной технике.

## **§ IV.2. Флюсы для дуговой автоматической, полуавтоматической и электрошлаковой сварки**

К флюсам для автоматической и полуавтоматической сварки плавящимся электродом предъявляется ряд общих требований:

- 1) обеспечение стабильности горения дуги и процесса сварки;

- 2) получение заданного химического состава металла сварных швов и их свойств;
- 3) обеспечение хорошего формирования металла шлаков;
- 4) получение швов без трещин и с минимальным (допустимым) количеством шлаковых включений и пористостью;
- 5) легкая отделяемость шлаковой корки от поверхности швов.

Пути решения этих задач связаны с составом свариваемого металла и применяемой электродной проволоки. В связи с этим и используемые для автоматической и полуавтоматической сварки флюсы являются весьма разнообразными.

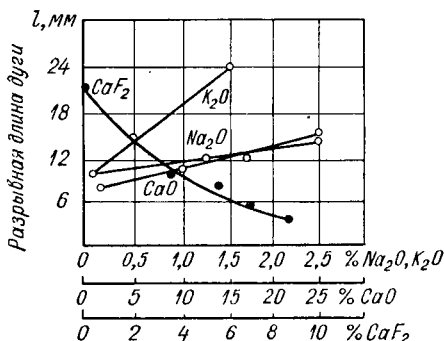


Рис. IV.1. Влияние некоторых химических соединений на стабилизирующие свойства высокомарганцовистых флюсов типа ОСЦ-45

Хотя при режимах дуговой сварки под флюсом, характеризующихся применением больших плотностей сварочного тока, чем при ручной сварке штучными электродами, дуга горит более устойчиво, однако и в этом случае полезно иногда вводить в состав флюсов ионизирующие составляющие. Так, применительно к некоторым высококремнистым флюсам влияние различных составляющих ( $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $CaO$  и  $CaF_2$ ) на ста-

бильность дуги по ее разрывной длине приведено на рис. IV.1. Повышение стабильности горения дуги позволяет более широко варьировать режимы сварки, чем в ряде случаев добиваться лучшего формирования швов.

Как уже указывалось ранее (§ II.5 и II.6), химический состав металла швов формируется как за счет основного и электродного металла, так и их изменений при сварке, в данном случае вследствие взаимодействия с флюсом. Эти изменения должны обязательно учитываться.

Иногда даже относительно небольшие изменения в составе металла швов приводят к заметным изменениям его структуры и свойств. Так, например, при сварке высоколегированных хромоникелевых сталей подобной же по составу электродной проволокой с довольно высоким содержанием кремния применение высококремнистых флюсов (что в данном случае мало меняет содержание кремния в шве) дает значительно более грубую столбчатую структуру шва, чем в случае сварки под низкокремнистыми флюсами [54]. Соответственно и свойства металла шва при грубой структуре хуже. При сварке никеля под высококремнистым флюсом марки ОСЦ-45, когда приращение кремния в металле шва составляет  $\sim 0,1\%$ , металл швов имеет крупнозернистое строение,



в то время как при сварке под бескремнистыми фторидными флюсами структура швов значительно лучше [54]. Видимо, в этих случаях влияют и другие характеристики процесса взаимодействия металл — расплавленный шлак.

Естественно, что на химический состав металла влияет и степень защиты от воздуха реакционного сварочного пространства. Она определяется как образующимся в результате горения дуги шлаковым куполом над реакционной зоной, так и высотой слоя твердых частиц флюса над этой зоной. Высота слоя насыпаемого на место сварки флюса с определенным полем грануляции частиц зависит и от режима сварки. Так, для наиболее распространенных флюсов, применяемых при сварке конструкционных малоуглеродистых и малолегированных сталей, рекомендации по количеству флюса, насыпаемого на место сварки, приведены в табл. IV.1.

Формирование шва связано в первую очередь с рядом свойств флюса (жидкотекучесть шлака при температуре, близкой к температуре плавления металла, межфазное натяжение на границе металл—шлак, вязкость шлака и др.), определяемых его составом. Так, ранее (§ II.5) отмечен ряд таких требуемых характеристик. Они должны учитывать и некоторые конкретные условия. Например, при автоматической (полуавтоматической) сварке под флюсом в нижнем положении вязкость шлаков при  $T_{пл}$  металла должна быть 1,5—4 пз, а при сварке кольцевых швов небольшого диаметра, для исключения стекания шлака, вязкость его должна быть больше, примерно 7 пз.

Как с физическими, так и с химическими свойствами шлаков связана и отделяемость корки шлака от металла.

Получение швов без трещин и допустимой (лучше минимальной) пористости зависит от состава металла шва, а следовательно, и от состава воздействующего на него при сварке шлака. При сварке целого ряда сплавов и сталей характерно появление в швах горячих трещин. Например, применительно к малоуглеродистым и низколегированным сталям сильными стимуляторами, снижающими сопротивляемость металла образованию горячих трещин, являются углерод и особенно сера. Склонность таких швов к горячим трещинам заметно уменьшается при огра-

Таблица IV.1  
Высота слоя флюса и рекомендуемая грануляция частиц для сварки на различных режимах

$I_{св}$ в а	Необходимая высота * слоя флюса в мм	Пределы грануляции частиц в мм
200	25—35	0,25—1,6
400	25—35	0,25—1,6
600	35—40	0,25—1,6
800	35—40	0,4—2,5
1000	45—60	0,4—2,5
1200	45—60	0,4—2,5

\* Насыпной вес флюса 1,7—1,8 г/см<sup>3</sup>.

ничении в металле шва содержания углерода ( $C \leq 0,10 \div 0,12\%$ ). Этого достичь довольно просто благодаря широкому освоению металлургической промышленностью изготовления малоуглеродистых электродных проволок (см. приложение I). Отрицательное действие серы начинает сказываться и при более низких ее концентрациях (практически, выше  $0,02\%$ ) и резко усиливается при увеличении ее содержания. Как правило, содержание серы в электродных проволоках, предназначенных для сварки малоуглеродистых сталей (Св-08, Св-08А и др.), металлургическая промышленность гарантирует с верхним пределом в  $0,03—0,04\%$ . В основном металле (горячекатаные листы малоуглеродистой стали) допустимый верхний предел содержания серы еще выше —  $0,045—0,055\%$ . За счет наиболее неблагоприятных условий смешивания основного и электродного металлов в сварочной ванне (при  $\psi \approx \frac{2}{3}$  и  $1 - \psi = \frac{1}{3}$ ) содержание серы в металле швов может (в случае отсутствия влияния шлака) находиться в следующих пределах:

$$[S]_{ми} = \psi [S]_{ом} + (1 - \psi) [S]_{эп};$$

$$[S]_{ми_{мин}} = \frac{2}{3} 0,045 + \frac{1}{3} 0,03 = 0,04\%;$$

$$[S]_{ми_{макс}} = \frac{2}{3} 0,055 + \frac{1}{3} 0,04 \approx 0,05\%.$$

Известно, что марганец, связывая серу в тугоплавкое соединение  $MnS$ , может заметно повысить сопротивляемость металла образованию горячих трещин. Обычно для сварочных условий применительно к малоуглеродистым сварным швам это достигается при соотношениях концентраций в металле  $\frac{[Mn]}{[S]} \approx 20$ . Тогда можно оценить желаемое количество марганца в швах для повышения их стойкости против образования горячих трещин:

$$[Mn]_{ми_{мин}} \approx 20 [S]_{ми_{мин}}; \quad [Mn]_{ми_{мин}} = 20 \cdot 0,04 = 0,8\%;$$

$$[Mn]_{ми_{макс}} \approx 20 [S]_{ми_{макс}}; \quad [Mn]_{ми_{макс}} = 20 \cdot 0,05 = 1,0.$$

Практически считается необходимым иметь концентрацию марганца в металле таких швов от  $0,7$  до  $1,1\%$ , т. е. достаточно близкую к рассчитанным значениям.

Таким образом, будем считать в среднем, что в металле шва нужно обеспечивать содержание марганца в пределах  $0,8—0,9\%$ .

Пористость швов обуславливается газовыделением из кристаллизующегося металла. Как было отмечено ранее (§ II.4), это возможно применительно к водороду и азоту в сталях в виде образования зародышей и их роста при понижении растворимости в связи с понижением температуры или, особенно, в период кристаллизации, когда их растворимость резко (скачкообразно)

уменьшается [68]. Склонность к порообразованию усиливается и реакцией окисления углерода, когда в металле возникает зародыш пузырька, некоторый объем окиси углерода, практически нерастворимого в железе и создающего поэтому в месте реакции огромное пересыщение. При прочих равных условиях подавление реакции  $\text{FeO} + \text{C} \rightleftharpoons \text{CO} + \text{Fe}$  облегчает получение беспористых швов. Эта реакция в значительной степени может быть подавлена при температурах, близких в температуре затвердевания стали в случае уменьшения концентрации углерода в жидком металле и наличия в нем достаточного количества элементов-раскислителей с большим в этих условиях сродством к кислороду. При обычной для сварки  $[\text{C}]_{\text{жид}} \approx 0,1\%$  наиболее эффективен в этом отношении кремний при его содержании 0,2—0,3%.

В целом для сварки малоуглеродистых и малолегируемых сталей необходимо относительно небольшое легирование металла швов. Оно может быть достигнуто взаимодействием металла с расплавленными шлаками, содержащими соединения марганца и кремния. Обычно такими соединениями являются окислы, а флюсы представляют собой достаточно равномерные по составу чисто шлаковые системы, полученные предварительным сплавлением исходных материалов. Такие флюсы называются плавлеными.

Источниками появления кремния в металле сварочной ванны в случае применения таких флюсов могут быть металлы — основной и электродный, а также шлаки — за счет кремневостановительного процесса [реакция (II.12)]. Рассмотрим предельные случаи для нескольких вариантов применительно к сварке кипящей ( $[\text{Si}]_{\text{ож}} \approx 0\%$ ) и успокоенной кремнием ( $[\text{Si}]_{\text{ож}} \approx 0,25\%$ ) стали.

Для кипящей стали:

при легированной кремнием проволоке и пассивном по кремнию флюсе

$$[\text{Si}]_{\text{жид}} = \psi [\text{Si}]_{\text{ож}} + (1 - \psi) [\text{Si}]_{\text{зн}} \pm \Delta [\text{Si}]_{\text{ш}};$$

$$0,25 = \frac{2}{3} \cdot 0 + \frac{1}{3} [\text{Si}]_{\text{зн}} \pm 0;$$

$$[\text{Si}]_{\text{зн}} = 0,25 \cdot 3 = 0,75\%;$$

при нелегированной проволоке (типа Св-08) и активном кремнесодержащем флюсе

$$0,25 = \frac{2}{3} \cdot 0 + \frac{1}{3} \cdot 0 \pm \Delta [\text{Si}]_{\text{ш}}.$$

Из уравнения (II.50) получаем:

$$\Delta [\text{Si}]_{\text{ш}} = 3(1 - \psi) [(\text{SiO}_2)_\phi - 0,24];$$

$$0,25 = 3 \frac{1}{3} [(\text{SiO}_2)_\phi - 0,24];$$

$$(\text{SiO}_2)_\phi = 0,25 + 0,24 = 0,49 \text{ или } 49\% \text{ мол.}$$

В марганцовистых флюсах с плавиковым шпатом, у которых другие составляющие имеют бóльший молекулярный вес, чем  $\text{SiO}_2$  (у  $\text{SiO}_2$  это 60; у  $\text{MnO}$  — 71; у  $\text{CaF}_2$  — 78), содержание  $\text{SiO}_2$  меньше 49% вес. и составляет обычно  $\sim 40$ — $43$ % вес. Следовательно, в этом случае нужны флюсы с высоким, около 40% вес., содержанием кремнезема.

Для спокойной стали (в среднем  $[\text{Si}]_{\text{ом}} = 0,25\%$ ):

при легированной проволоке и пассивном по кремнию флюсе

$$0,25 = \frac{2}{3} 0,25 + \frac{1}{3} [\text{Si}]_{\text{зн}}; \quad [\text{Si}]_{\text{зн}} = 0,25\%,$$

т. е. легированная кремнием проволока не нужна;

при нелегированной проволоке ( $[\text{Si}]_{\text{зн}} \approx 0$ ) и активном кремнесодержащем флюсе

$$0,25 = \frac{2}{3} 0,25 + \frac{1}{3} \Delta [\text{Si}]_{\text{ш}}; \quad \Delta [\text{Si}]_{\text{ш}} = 0,083;$$

$$\Delta [\text{Si}]_{\text{ш}} = 3 \frac{1}{3} [(\text{SiO}_2)_{\text{ш}} - 0,24]; \quad 0,083 = (\text{SiO}_2)_{\text{ш}} - 0,24;$$

$$(\text{SiO}_2)_{\text{ш}} = 0,323 \text{ или } \sim 33\% \text{ мол.}$$

В этом случае  $(\text{SiO}_2)_{\text{ш}} \approx 25$ — $30\%$  вес.

Аналогично может быть подсчитано и введение в шов марганца до требуемых количеств — около 0,9%. Примем  $[\text{Mn}]_{\text{ом}} \approx 0,35\%$  и  $[\text{Mn}]_{\text{зн}} \approx 0,4\%$  (типа Св-08). Тогда шлак должен обеспечить легирование марганцем:

$$[\text{Mn}]_{\text{шш}} = \psi [\text{Mn}]_{\text{ом}} + (1 - \psi) [\text{Mn}]_{\text{зн}} + \Delta [\text{Mn}]_{\text{ш}};$$

$$0,9 = \frac{2}{3} 0,35 + \frac{1}{3} 0,4 + \Delta [\text{Mn}]_{\text{ш}};$$

$$\Delta [\text{Mn}]_{\text{ш}} = 0,9 - 0,26 = 0,64.$$

$\Delta [\text{Mn}]_{\text{ш}}$  считаем по формуле (II.51):

$$\Delta [\text{Mn}]_{\text{ш}} = 4,4 [(\text{MnO})_{\text{ф}} - 0,12];$$

$$0,64 = 4,4 [(\text{MnO})_{\text{ф}} - 0,12];$$

$(\text{MnO})_{\text{ф}} \approx 0,27$ , или 27% мол., или  $\sim 30$ — $33\%$  вес.

Для пассивного по марганцу флюса  $(\text{MnO})_{\text{ф}} \leq 15\%$  вес., легирование марганцем должно осуществляться через электродную проволоку:

$$0,9 = \frac{2}{3} 0,35 + \frac{1}{3} [\text{Mn}]_{\text{зн}}; \quad [\text{Mn}]_{\text{зн}} = 3(0,9 - 0,233) = 2\%.$$

Таким образом для сварки малоуглеродистой стали возможен совместный подбор состава электродной проволоки и флюса, обеспечивающий получение состава шва с 0,8—0,9% Mn и 0,25% Si, который при 0,1% C будет обеспечивать необходимое качество закристаллизовавшегося металла и, как известно, достаточно

высокие для сварных соединений малоуглеродистой стали механические свойства металла шва.

В настоящее время для сварки под флюсом малоуглеродистых сталей применяются три основные системы выбора сварочных материалов.

1. Малоуглеродистая нелегированная электродная проволока и высокомарганцовистый (35—45% MnO) флюс с достаточно высоким содержанием кремнезема (40—45% SiO<sub>2</sub>). В этом случае необходимое легирование, согласно расчету, приведенному выше, обеспечивается кремнемарганцевосстановительными процессами взаимодействия металл—флюс.

2. Низкоуглеродистая проволока, легированная марганцем примерно до 2%, и высококремнистый (кислый) флюс — ~40% SiO<sub>2</sub>, не больше 15% MnO. Легирование металла шва марганцем в этом случае осуществляется электродной проволокой, а кремнием — из флюса за счет кремневосстановительных процессов.

3. Среднемарганцовистая электродная проволока ( $[Mn]_{эп} \approx 1\%$ ) или низкоуглеродистая проволока из кипящей стали ( $[Mn]_{эп} \approx 0,4\text{—}0,5\%$ ,  $[Si]_{эп} \leq 0,03\%$ ) и среднемарганцовистый (~30% MnO) кислый флюс.

Все флюсы, применяемые для сварки углеродистых и некоторых низколегированных сталей, широко применяющихся как обычные конструкционные, кроме SiO<sub>2</sub> и MnO содержат и другие составляющие, либо вводимые намеренно, для получения тех или иных свойств, либо поступающие как сопутствующие примеси, как правило, ограничиваемые определенными пределами. Так, наиболее распространенной добавкой к таким флюсам является CaF<sub>2</sub>, вводимый в целях изменения физических свойств шлаков и для уменьшения парциального давления водорода в атмосфере закрытой дуги [см. реакцию (II.44)]. Также обычными составляющими являются Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, часто — MgO, TiO<sub>2</sub>, иногда B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др. Как правило, ограничиваемыми примесями являются FeO, серные и фосфористые соединения.

Некоторые составы флюсов из этой группы приведены в табл. IV.2.

Как следует из § II.5, кремнемарганцевосстановительные процессы приводят не только к легированию металла кремнием и марганцем, но и растворению в нем FeO, т. е. к появлению в металле дополнительного кислорода [см. формулу (II.52)]. Получаемое приращение кислорода  $\Delta [O]_{ми}$  при этом складывается из приращения от восстановления кремнезема  $\Delta [O]_{миSiO_2}$  и восстановления окиси марганца —  $\Delta [O]_{миMnO}$ , которые соответственно могут быть оценены [73] соотношениями:

$$\Delta [O]_{миSiO_2} = 0,142 \Delta [Si]_{миSiO_2}; \quad (IV.1)$$

$$\Delta [O]_{миMnO} = 0,036 \Delta [Mn]_{миMnO}. \quad (IV.2)$$

Некоторые флюсы, применяемые при сварке малоуглеродистых  
и некоторых конструкционных малолегированных сталей

Марка флюса	Техническая Документация	Химический состав флюса, % (вес)						
		SiO <sub>2</sub>	MnO	CaF <sub>2</sub>	CaO	MgO		
ОСЦ-45	ГОСТ 9087-59	38,0—44,0	38,0—47,0	6,0—9,0	≤6,5	≤2,5		
АН-348А	ГОСТ 9087-59	41,0—44,0	34,0—38,0	4,0—5,5	≤6,5	5,5—7,5		
АН-348АМ	ГОСТ 9087-59	41,0—44,0	34,0—38,0	3,5—4,5	≤6,5	5,0—7,5		
ОСЦ-45М	ГОСТ 9087-59	38,0—44,0	38,0—47,0	6,0—9,0	≤6,5	≤2,5		
ФЦ-9	По ТУ	37,0—42,0	36,0—41,0	2,0—3,0	≤5,0	≤2,0		
ЛПИ-609	По ТУ	33,0—40,0	35,0—40,0	≤2,5	4,5—6,0	≤2,0		
АН-51	По ТУ	31,0—33,0	5,0—6,5	7,0—8,5	12,0—15,0	14,0—17,0		
Химический состав флюса, % (вес)								
Марка флюса	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	P
ОСЦ-45	≤5,0	—	—	—	—	2,0	0,15	0,15
АН-348А	≤4,5	—	0,1—0,3	—	—	2,0	0,15	0,12
АН-348АМ	≤4,5	—	0,1—0,3	—	—	2,0	0,15	0,12
ОСЦ-45М	≤5,0	—	—	—	—	2,0	0,15	0,10
ФЦ-9	9,0—13,0	—	—	—	1,5	—	0,15	0,10
ЛПИ-609	9,0—12,0	0,4—0,8	—	1,5—6,0	—	≤1,5	0,15	0,15
АН-51	21,0—23,0	—	—	1,5—2,5	1,5	—	0,15	0,05

Для принятого выше случая, когда  $\Delta [\text{Si}]_{\text{шв}} \approx 0,25\%$  и  $\Delta [\text{Mn}]_{\text{шв}} \approx 0,5\%$ , получаем соответственно приращение кислорода в металле шва

$$\Delta [\text{O}]_{\text{шв}} = \Delta [\text{O}]_{\text{швSiO}_2} + \Delta [\text{O}]_{\text{швMnO}} = 0,142 \cdot 0,25 + 0,036 \cdot 0,5 = 0,035 + 0,018 = 0,053\%$$

Так как обычно содержание кислорода в горячекатаных листах малоуглеродистой стали и в электродной проволоке из кипящей стали составляет 0,01—0,03%, то в металле шва можно ожидать ~0,06%—0,08% кислорода, что и совпадает с рядом опубликованных данных [73] применительно к сварке такими сварочными материалами.

В верхних слоях многослойной наплавки и в многослойных швах в связи с увеличением доли наплавленного металла (см. § II.6) содержание кислорода в последующих слоях возрастает (примерно до 0,1%).

Если в некоторых случаях, в частности для сварных соединений из малоуглеродистых сталей, работающих при нормальных температурах, такое содержание кислорода в металле швов по свойствам практически допустимо, то для ряда других материалов и условий эксплуатации такое повышение концентрации кислорода недопустимо. Так, например, для швов среднелегированных сталей, работающих при повышенных температурах, приходится считаться с процессами старения металла, интенсифицируемого при повышенных концентрациях кислорода.

Ограничения такого повышения содержания кислорода в швах можно достичь, обеспечив их химический состав за счет металлических составляющих (электродная проволока, основной металл) и ослабив интенсивность восстановительных процессов в результате взаимодействия металл—шлак (т. е. применив пассивные флюсы). Пассивность флюса может быть достигнута двумя путями:

1) применением такой композиции флюса—шлака, когда он будет, по существу, разновесен (условно равновесен применительно к сварочной обстановке, см. § II.2) с составом обрабатываемого им металла. Естественно, что такое условное равновесие связывается с температурно-временными характеристиками сварки, а поэтому позволяет получать желаемый результат только применительно к конкретным задачам;

2) использованием флюсов, в составе которых имеются только такие соединения, которые, будучи весьма стойкими даже в сварочных условиях, с металлом практически не реагируют. Из окислов к ним относятся  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , в меньшей степени  $\text{TiO}_2$ , т. е. окислы элементов с очень высоким сродством к кислороду.

Практически почти не реагирует с металлом  $\text{CaF}_2$  и некоторые другие галогениды.

В целях уменьшения окисления металла за счет его реакций с флюсом для сварки легированных сталей применяются флюсы

с ограниченной концентрацией  $\text{SiO}_2$  и  $\text{MnO}$ . Некоторые примеры таких флюсов приведены в табл. IV.3.

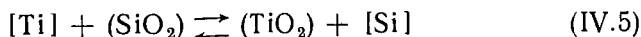
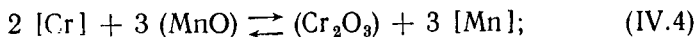
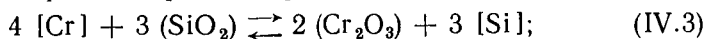
Т а б л и ц а IV.3

Флюсы для сварки легированных сталей

Марка флюса	Химический состав флюса в % вес.									
	$\text{SiO}_2$	$\text{MnO}$	$\text{CaF}_2$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	$\text{FeO}$	S	P
	не более									
АН-10	20—23	29—33	18—24	3—7	$\leq 1,2$	19—21	0,4—0,6	1,2	0,15	0,20
АН-15	24—29	1,8—2,2	20—22	14—18	9—10	22—25	—	0,8	0,03	0,03
480Ф-10	9—12	$\leq 0,5$	35—46	$\leq 8$	11—14	28—34	—	1,5	0,05	0,05

Хотя во флюсах АН-10 и АН-42 количество  $\text{MnO}$  и особенно  $\text{SiO}_2$  по сравнению с флюсами, приведенными в табл. IV.2, заметно снижено, кремневосстановительные процессы в случае легированной электродной проволоки проявляются и при таких концентрациях  $\text{SiO}_2$  (см. рис. II.29). Для дальнейшего ограничения этого процесса с целью получения теплостойких швов, обладающих малой склонностью к старению, во флюсе 480Ф-10 содержание и  $\text{SiO}_2$ , и  $\text{MnO}$  снижено в еще большей степени. Хотя уменьшение содержания  $\text{SiO}_2$  несколько ухудшает технологические характеристики флюса, при приведенных в табл. IV.3 составах они обладают еще достаточно хорошей формирующей шов способностью, легкой удаляемостью шлаковой корки и другими свойствами, важными для их использования в производстве.

Еще сложнее задача выбора флюсов для сварки высоколегированных сталей, в частности, сталей аустенитного класса, широко применяемых для изготовления сварных конструкций. В этом случае в металле имеется, как правило, значительное количество хрома (15—25%), имеющего большее сродство к кислороду, чем железо, а также титан, алюминий и другие легирующие, которые интенсивно реагируют с рядом окислов, входящих в состав флюса. При этом развиваются реакции:



и другие.

В результате таких реакций металл обедняется необходимыми легирующими ( $\text{Cr}$ ,  $\text{Ti}$  и пр.) и обогащается другими элементами ( $\text{Si}$ ,  $\text{Mn}$ ), которые по своему действию не заменяют выгоревших, а в ряде случаев могут быть даже вредными.



Для сварки таких сталей применяются флюсы, в основном состоящие из очень стойких окислов —  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и галогенида  $\text{CaF}_2$ . Количество  $\text{SiO}_2$ , допускаемое в таких флюсах, определяется необходимостью обеспечения их технологических свойств, при этом должна учитываться и склонность металла шва к порообразованию, усиливающаяся при  $(\text{SiO}_2)_\phi \leq 3\%$ . Характерные флюсы этой группы приведены в табл. IV.4.

Т а б л и ц а IV.4

Флюсы для сварки высоколегированных сталей

Марка флюса	Химический состав флюса в % вес.								
	$\text{SiO}_2$	$\text{MnO}$	$\text{CaF}_2$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{FeO}$	$\text{S}$	$\text{P}$
							не более		
АН-22	18—21	6—9	20—24	12—15	11—15	19—23	1,0	0,06	0,06
АН-30	2—5	$\leq 0,5$	19—23	16—20	13—16	39—44	1,0	0,08	0,05
480Ф-6	$\leq 4,0$	$\leq 0,3$	45—60	16—23	$\leq 3,0$	20—27	1,5	0,05	0,04
480Ф-7	$\leq 4,0$	$\leq 0,3$	60—75	9—16	$\leq 3,0$	12—20	1,5	0,05	0,04

Флюсы с малым содержанием  $\text{SiO}_2$  склонны к гидратации и повышению содержания в них конституционной, в частности цеолитной, воды. Она выделяется в процессе сварки и в зоне дуги приводит к возникновению водородсодержащей атмосферы, способствующей значительному увеличению содержания водорода в сварочной ванне и металле сварных швов. Поэтому подобные флюсы требуют значительного повышения температуры прокалки и использования только в свежeproкаленном состоянии. Обычно прокалка таких флюсов производится при температуре 800—900° С.

Однако даже флюсы типа 480Ф-6, 480Ф-7 не являются полностью неокислительными. В частности, наличие в их составе  $\text{SiO}_2$  вполне может привести к заметному окислению элементов с высоким сродством к кислороду. Например, в нержавеющей аустенитных сталях таким элементом является титан. Можно ориентировочно подсчитать, какие же могут быть потери титана при сварке под таким флюсом за счет реакции (IV.5).

Можно приближенно принять расход флюса в количестве 1 кг на 1 кг наплавленного металла или около 0,5 кг на 1 кг металла шва. Тогда при наличии 3%  $\text{SiO}_2$  во флюсе и при его среднем использовании  $\sim 25\%$  от общего расплавляемого количества (см. § II.5, рис. II.29) возможное количество  $\text{SiO}_2$  по реакции (IV.5) будет  $0,03 \cdot 0,5 \cdot 0,25 = 0,00375$  кг или 3,75 г на 1 кг металла шва. В пересчете на кислород это составит  $3,75 \frac{32}{60} = 2,0$  г. Этого количества достаточно для окисления  $2,0 \frac{40}{32} = 2,5$  г

титана или 0,25% от 1 кг металла. Если обычно такие стали содержат 0,6—0,8% Ti, то в результате реакции с  $(\text{SiO}_2)_f$  будет выгорать в среднем  $\frac{1}{3}$  имеющегося в стали титана (принимая его концентрации в основном металле и в электродной проволоке одинаковыми).

Видимо, совершенно неокисленными могут быть флюсы, не содержащие окислов, в частности, состоящие из галогенидов. Такие бескислородные флюсы на базе плавикового шпата были предложены Институтом электросварки им. Е. О. Патона [56, 77]. Хотя их технологические характеристики заметно хуже, чем у флюсов, содержащих и окислы и галогениды, они получили в ряде случаев практическое применение. Например, при сварке титановых сплавов, как при автоматической под флюсом, так и при электрошлаковой, используются флюсы на базе  $\text{CaF}_2$  с некоторыми добавками. В связи с относительно невысокой температурой плавления этих флюсов (менее 1318°С — температуры плавления  $\text{CaF}_2$ ) они ограничивают сварочные режимы. Так, при больших силах сварочного тока шлак сильно перегревается и перестает выполнять свои защитные функции. Наряду с этим между гранулами флюса находится воздух, который взаимодействует с расплавленным металлом. При этом большое значение имеет время нахождения металла ванны в расплавленном состоянии, т. е. время реакции кислорода с расплавом. Поэтому сварка титановых сплавов под флюсом оказывается целесообразной только при относительно небольшой толщине свариваемого металла (т. е. при малом времени взаимодействия металла и флюса).

Флюсы на базе хлористых солей используются при сварке алюминия и некоторых его сплавов; при этом наличие в сплавах магния ограничивает возможные количества во флюсе натриевых (меньше литиевых) солей в связи с тем, что даже ничтожные количества натрия в таких сплавах ухудшают механические свойства металла шва (снижая и прочность, и, особенно, пластичность).

Некоторые флюсы на базе газогенидов приведены в табл. IV.5.

Рассмотренные выше плавные флюсы являлись системами, состоящими из неметаллических составляющих, окисных и галогенных соединений. Легирование металла в этих случаях может иметь место только в результате диссоциации соединений, входящих в состав флюса, или в результате обменных реакций типа (II.11), (II.12), а также (IV.3), (IV.4) и (IV.5), которые сопровождаются либо повышением в металле концентрации кислорода, либо потерей им других полезных легирующих составляющих. Естественно, что вводить такими способами большое количество легирующих элементов в металл через флюс — шлак затруднительно, и оно ограничивается, как правило, десятками долями процента.

Другим методом легирования через флюсы является введение в их состав свободных металлических составляющих. В этих

Флюсы на базе галогенидов

Марка флюса	Состав на базе галогенидов						Назначение флюса
	CaF <sub>2</sub>	NaF	KCl	BaCl <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> AlF <sub>6</sub>	SrF <sub>2</sub> + SrCl <sub>2</sub>	
АНФ-5	75—80	25—20	—	—	—	—	Для сварки нержавеющих и жаропрочных Cr—Ni сталей
МАТИ-10	—	—	30	68	2	—	Для сварки алюминия по слою флюса
АН-Т	92	1	—	—	—	7	Для сварки сплавов титана

случаях флюс представляет собой смесь металлических и неметаллических составляющих. Для получения достаточно равномерного флюса желательно, чтобы каждая его частица (гранула) имела бы состав, близкий к среднему составу флюса, т. е. тоже имела бы как металлические, так и неметаллические составляющие. Это может быть достигнуто тем же способом, что и в электродных покрытиях, — получением достаточно равномерной смеси порошков, созданием из них замеса на связующем соответствующей вязкости, из которого тем или иным способом получают гранулы нужного размера и необходимой прочности. Такие флюсы называют керамическими.

Составы керамических флюсов могут быть весьма разнообразными, включающими различные окислы, карбонаты, галогениды, металлические порошки, различные сложные соединения и связующие. В качестве основного вида связующего, так же как для электродных покрытий, обычно используется жидкое стекло.

В случаях отрицательного влияния SiO<sub>2</sub> флюса на состав расплавляемого металла, например, в связи с реакциями (IV.3), (IV.5), присутствие жидкого стекла нежелательно, и связывание частиц тогда осуществляется их спеканием — сплавлением на солевых растворах [38], хотя при этом механическая прочность частиц становится меньше, чем в случае применения жидкого стекла. Одновременно и технология таких сплавленно-спеченных флюсов сложнее, чем обычных керамических.

Обладая важным преимуществом в виде возможности широкого диапазона легирования наплавленного металла и металла шва, керамические флюсы имеют и весьма существенный недостаток. Степень осуществляемого ими легирования связана с количеством расплавляемого флюса, а оно в сильной степени зависит от сварочного режима и однородности химического состава флюса. И чем полнее будет использоваться легирующая способность

флюса, тем больше будет нестабильность состава металла шва или наплавки.

Кроме того, при введении во флюс тугоплавких металлов они могут неполностью растворяться в ванне, создавая локальные химическую неоднородность в пределах иногда недопустимых.

Однако, несмотря на отмеченные недостатки, керамические флюсы достаточно широко применяются и в СССР, и за границей

Таблица IV.6

Составы некоторых керамических флюсов, применяемых в СССР для сварки и наплавки, в % вес.

Составляющие флюс материалы	Марка флюса						
	П	К-2	КВС-19	КС-80ХГСНА	КС-Ш	КС-С	ФЦК
Марганцевая руда	—	—	54,0	—	—	—	—
Титановый концентрат	—	55,0	—	—	—	—	—
Полевой шпат	—	13,0	—	—	—	—	8,0
Кварцевый песок	—	—	30,0	—	5,0	—	—
Плавленый шпат	20,0	10,0	7,0	20,0	6,0	20,0	—
Хлористый калий	—	—	—	—	—	—	77,0
Фтористый натрий	—	—	—	—	—	—	—
Мрамор	72,5	—	—	50,3	42,4	35,8	5,0
Двуокись титана	—	—	—	15,0	6,0	5,0	10,0
Глинозем	—	—	—	—	—	—	—
Ферросилиций	2,0	8,0	7,0	4,2	—	4,7	—
Ферромарганец малоуглеродистый	0,5	14,0	—	1,7	—	0,5	—
Ферротитан	2,0	—	2,0	6,0	14,0	6,0	—
Феррохром углеродистый	—	—	—	—	24,0	23,0	—
Ферроалюминий	3,0	—	—	—	1,5	—	—
Никель металлический	—	—	—	1,4	—	2,0	—
Графит	—	—	—	1,4	1,1	3,0*	—
Силикат натрия, раствор плотностью 1,25, в % к шихте	20,0	13,0	30,0	20,0	17,0	15,0	—

\* Кокс.

как для сварки различных сталей, так и для наплавки слоев с особыми свойствами. Примеры керамических флюсов, применяемых в СССР, приведены в табл. IV.6.

Флюсы для полуавтоматической сварки должны несколько отличаться от флюсов для автоматической сварки. По грануляции они, как правило, должны быть более мелкими (см. табл. IV.1). В их составе должно быть меньшее количество вредных примесей, в частности серы и фосфора. Это определяется тем, что при большей плотности тока в электродной проволоке малых диаметров, применяемой для полуавтоматической сварки, интенсивность реакций взаимодействия металл—шлак повышается за счет некоторого повышения температуры дуги и мелкокапельного переноса металла с электрода в ванну (см. § II.5).

К флюсам для электрошлаковой сварки также предъявляются некоторые специфические требования, в частности требования в отношении их электропроводности (что обеспечивает получение устойчивого процесса сварки и необходимое тепловыделение в ванне) и вязкости (очень короткие шлаки с низкой вязкостью могут, отжимая формирующие устройства от изделия при кристаллизации корки шлака, создавать щели, через которые вытекает жидкий шлак).

Характер изменения электропроводности различных шлаков при высоких температурах приведен на рис. IV.2. Наиболее высокой электропроводностью обладает расплавленный  $\text{CaF}_2$  (а также другие фториды) и флюсы с его высоким содержанием.

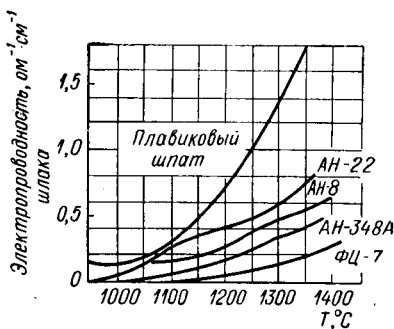


Рис. IV.2. Зависимость изменения электропроводности шлаков от температуры для флюсов существующих марок

Таблица IV.7

Некоторые флюсы для электрошлаковой сварки

Марка флюса	Химический состав в % вес.								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	CaF <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	FeO	S	P
	не более								
АН-25	6—9	—	12—15	2—4	33—40	30—40	—	0,1	0,1
АНФ-6 *	—	35	—	—	65	—	—	—	—
АНФ-7 *	—	—	20	—	80	—	—	—	—

\* Состав шихты.

В ряде случаев для электрошлаковых процессов удобно применение флюсов, обладающих достаточной электропроводностью и при достаточно низких температурах. Обычно это флюсы со значительным содержанием  $TiO_2$ . В табл. IV.7 приведен состав такого специального флюса марки АН-25 и некоторых других флюсов для электрошлаковой сварки.

Однако для электрошлаковой сварки в ряде случаев с успехом применяются и флюсы, предназначенные для дуговой сварки, в частности, АН-348, АН-22, 480Ф-6 и др.

### § IV.3. Производство флюсов для дуговой автоматической, полуавтоматической и электрошлаковой сварки

Флюсы для этих способов сварки в нашей стране ежегодно используются в количествах, измеряемых десятками тысяч тонн. Поэтому наиболее рационально их массовое производство. В СССР массовое производство организовано по изготовлению плавящихся флюсов. Керамические флюсы изготавливаются в значительно меньшем объеме и, как правило, самими предприятиями их применяющими.

Не все плавящиеся флюсы производятся массовыми методами. Это характерно главным образом для флюсов широкого использования — для сварки низкоуглеродистых и малолегированных сталей (см. табл. IV.2, флюсы ОСЦ-45, АН-348), а также и для сварки некоторых средне- и высоколегированных сталей (например, АН-22, 480Ф-6 и др.).

Плавящиеся флюсы готовят либо в пламенных, либо в электрических печах сплавлением порошкообразной шихты, смешанной по определенному расчету составу из соответствующих материалов. При этом гранулометрический состав материалов шихты при плавке в электрических печах должен характеризоваться большим средним размером кусков (обычно в поперечном размере от 2 до 8 мм), а для пламенных — меньшим, что позволяет ускорить получение расплава при более низких температурах. Количество пылевидной фракции ограничивается в обоих случаях.

Подготовка материалов, входящих в шихту, сводится к их просушке и дроблению. Расчетный состав шихты, как правило, отличается от требуемого состава флюса вследствие потери тех или иных составляющих в процессе плавки в печах и увеличения других составляющих, например из футеровки печи. Поправочные коэффициенты обычно устанавливаются экспериментально и имеют различные значения применительно к изготовлению флюсов в пламенных или электрических печах. Так, для приготовления флюса ОСЦ-45 в электрических печах обычно шихты рассчитывают на такой состав (в % вес.):  $41_{-1,5}^{+0,5} SiO_2$ ;  $45_{-1,5}^{+0,5} MnO$ ;

$9,5 \pm 0,5 \text{ CaF}_2$ ;  $\leq 3,5 \text{ CaO}$ ;  $\leq 1,0 \text{ MgO}$ ;  $\leq 1,59 \text{ Al}_2\text{O}_3$ ;  $\leq 1,5 \text{ FeO}$ ;  $\leq 0,15 \text{ S}$  и  $\leq 0,15 \text{ P}$ . Как следует из сопоставления с марочными пределами соединений, во флюсе шихта рассчитывается на потери  $\text{CaF}_2$ , повышенные потери  $\text{MnO}$  и возможное возрастание  $\text{CaO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Расчет производится по формуле

$$Q = \frac{a}{b} 100, \quad (\text{IV.6})$$

где  $Q$  — необходимое количество материала в вес. ч.;

$a$  — процентное содержание во флюсе того соединения, которое вводится этим материалом;

$b$  — процентное содержание этого же соединения во вводимом материале по химическому анализу.

При наличии какого-то соединения как примеси в других материалах (например,  $\text{SiO}_2$  в плавиковом шпате, марганцевой руде и пр.) оно сначала подсчитывается как вводимое через эти материалы, а затем недостающее количество подсчитывается с основным материалом (в данном случае — кварцевым песком).

Сверх расчетной шихты в нее добавляют углеродистые вещества (древесный уголь, кокс) в количестве  $\sim 2,5\%$  при плавке в электрических печах и  $\sim 4,5\%$  — в пламенных. Эти углеродистые составляющие должны обеспечить определенное раскисление флюса в процессе его выплавки.

Развешенные по рецепту измельченные материалы механически перемешиваются и подготавливаются для загрузки в печи. Иногда некоторые материалы (например, плавиковый шпат) в первоначальную массу не замешивают, а вводят в печь уже в процессе плавки для уменьшения потерь.

Варка флюсов в пламенных печах осуществляется на стекловарочных заводах. Схема пламенной печи с площадью пода  $\sim 4 \text{ м}^2$  показана на рис. IV.3. Предварительно подогретые газ и воздух поступают в горелки печи. Сгорание смеси происходит как на выходе из горелок, так и в самом пространстве печи, над обрабатываемым материалом. Шихту загружают в печь через завалочное окно, а готовый флюс выпускают через специальную летку. Рабочее пространство печи футеровано огнеупорными материалами, причем под футерован диновым кирпичом, а свод и боковые стенки, подвергающиеся непосредственному действию пламени, — шамотом.

В начале работы печи добиваются расплавления относительно небольшого количества шихты, а затем вводят дополнительные порции шихты по  $1\text{—}1,5 \text{ т}$ . По мере достижения готовности флюса его частично выпускают через летку. Время нахождения флюса в печи в среднем около  $2,0\text{—}2,5 \text{ ч}$ . Варка флюса производится при температуре  $1400\text{—}1500^\circ \text{C}$ . Производительность таких печей в среднем составляет около  $1500 \text{ кг}$  флюса в час.

Большинство флюсов специального назначения, применяемых в промышленности в меньшем объеме, чем АН-348 и ОСЦ-45, обычно варят в электрических печах. Некоторые отрасли промышленности предпочитают для себя изготовлять и флюсы общего назначения (например, ОСЦ-45) тоже в электрических печах, что дает возможность получать их с меньшим содержанием серы и фосфора.

Конструкции и мощности электрических печей для варки флюсов весьма разнообразны. Плавильное пространство печей может

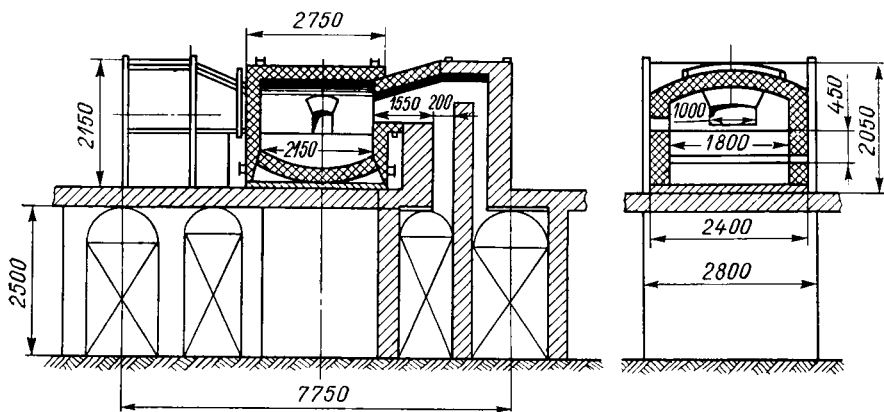


Рис. IV.3. Пламенная печь для плавки флюса

быть образовано из футеровки, составленной из различных углеродистых веществ (например, из смеси 70% зерен антрацита, мелкого кокса и каменноугольной пыли и 30% смолы), или выполнено в виде металлического водоохлаждаемого тигля. Печи могут быть неподвижными (с выпуском готового флюса через летку) и наклоняющимися (выпускающими флюс переливанием через носок).

Принцип работы печей одинаков. Во внутреннее пространство печи, являющееся токоведущим, подключенным к питающему трансформатору, насыпается некоторая часть шихты. Опускается графитовый электрод, обычно диаметром около 100 мм, подключенный ко второму полюсу источника питания. Первоначальная загрузка расплавляется зажженной дугой, причем необходимое количество расплавленной массы регулируется дополнительной подсыпкой шихты. При достижении расплавления достаточного количества шихты электрод погружается в него, и дальнейшее расплавление шихты происходит вследствие выделения тепла при прохождении тока по ванне расплава. Постепенное пополнение тигля шихтой приводит к установившемуся процессу варки флюса.



Электрические печи с емкостью около 100 кг единовременной массы изготавливаемого флюса обеспечивают его готовность в течение 1—1,5 ч плавки. В наиболее мощных печах емкостью около 4000 кг продолжительность плавки составляет около 3 ч.

Общее представление о конструкции электрической печи для варки флюсов дает рис. IV.4.

Электрические печи позволяют осуществлять перегрев флюсов при варке в большей степени, чем пламенные. В некоторых случаях это может быть необходимо в целях получения тех или иных характеристик флюса.

Флюс после плавки подвергается грануляции — либо мокрой, либо сухой. При мокрой грануляции струя расплавленного флюса вы-

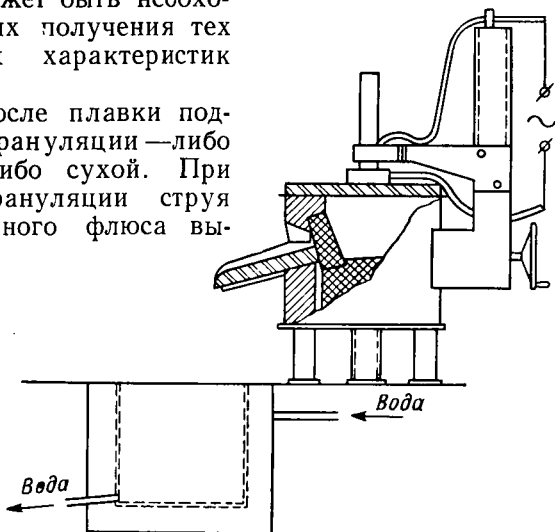


Рис. IV.4. Электрическая печь для плавки флюса

ливается в бак с холодной проточной водой, причем полезно ее над поверхностью воды в баке разбивать сильной струей воды. После охлаждения флюс в виде отдельных частиц и слипшихся кусков освобождают от воды, пропускают через дробильные валки для получения нужного размера, просеивают через сита и просушивают или прокачивают.

В зависимости от состава расплава флюса и степени его перегрева в момент выпуска такая грануляция может привести к получению либо достаточно плотных равномерных гранул — «стекловидного» флюса, либо пористого, рыхлого, «пемзовидного» флюса. Естественно, что насыпной вес пемзовидного флюса примерно в 1,5—2 раза меньше, чем стекловидного флюса такого же состава. Как правило, пемзовидные флюсы обеспечивают худшую защиту металла от окисления и азотирования, но дают лучшее формирование швов при высоких режимах и больших скоростях сварки.

Сухое гранулирование осуществляется после выливания расплавленного флюса на чистый металлический лист или дробления струей сухого воздуха. Полученная масса или частицы дробятся,

гранулируются в валках и упаковываются в этом случае без предварительной сушки. В целом сварка под флюсом, прошедшим сухую грануляцию, обеспечивает меньшее количество водорода в сварных швах, чем сварка под флюсом мокрой грануляции.

Контроль качества плавящихся флюсов производится применительно к шихте (контроль исходных материалов, их состава и подготовки) в процессе плавки (по цвету застывшей пробы массы и пр.) и готового продукта. Готовый флюс проверяется по химическому составу (он должен отвечать марочному составу) и по

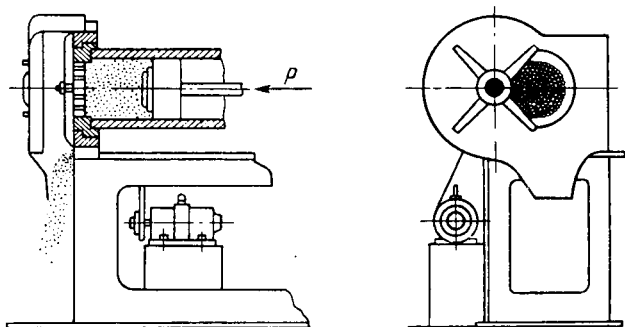


Рис. IV.5. Установка для изготовления керамического флюса; рубка подаваемой массы на кусочки

технологическим сварочным характеристикам (формирование шва, его сопротивляемость образованию трещин и пор и др.).

Принципиально совершенно иная технология изготовления керамических флюсов. Подготовка материалов, их дробление, составление шихты и смешивание ее со связующими остаются такими же, как при подготовке обмазочной массы для нанесения на электроды (см. § III.5). Дальнейшая обработка массы должна обеспечить получение прочных, сухих частиц заданных размеров. Это достигается методами индивидуального или массового производства.

При индивидуальном или мелкосерийном производстве массу разливают на металлический очищенный лист, и после того как она засохнет, дробят с дальнейшим рассевом по грануляции. В этом случае выход годного флюса очень низок — получается много отходов в виде пылевидной фракции. Для получения значительно большего выхода годного флюса сырую массу протирают через сита с определенной сеткой.

В массовом производстве для изготовления гранулированной крупки из приготовленной массы применяются различные механизированные устройства (грануляторы).

Принципиальная схема одного из типов грануляторов приведена на рис. IV.5. Выдавливаемая прессом масса через отверстия диаметром  $\sim 1,5$  мм попадает под вращающиеся ножи, которые

отрубают от нее кусочки длиной около 2,0—2,5 мм. Мелкие цилиндрики достаточно плотной массы падают в сборник, где частично склеиваются, и затем поступают на сушку при температуре 150—200° С. Затем их просеивают через сита с 25 *отв/см*<sup>2</sup> (сетка 1,6 по ГОСТу 3584—53 или 6613—53). Просеянная крупка подвергается прокалке обычно при температуре ~350° С в течение 2—3 ч.

Контроль качества неплавленых керамических флюсов в производстве осуществляется в целом подобно контролю плавных флюсов. Он включает контроль исходных материалов, технологических операций их переработки (подобно электродному производству) и готового продукта (по среднему химическому составу, а также при выполнении сварки или наплавки с оценкой получаемых свойств металла шва наплавленного слоя).

#### § IV.4. Другие флюсы, применяемые в сварочном производстве

Флюсы применяются не только при дуговой сварке плавящимся электродом и электрошлаковой сваркой, но и при других технологических процессах сварочного производства. Так, флюсы часто используются при пайке, при сварке независимым источником тепла (газовой сварке ряда металлов и сплавов; иногда дуговой сварке неплавящимся электродом в защитных газах), а также при кислородной резке некоторых металлов и сплавов (чугуны, высокохромистые стали, сплавы на основе меди и др.).

При сварке и пайке задачами, которые решаются применением флюсов, является удаление с поверхностей соединяемых металлов окислов и других загрязнений, мешающих получению необходимых свойств сварных или паяных швов. Кроме того, они должны ограничивать появление новых окислов (и других соединений), которые могут появляться на металле в самом процессе сварки и пайки. Таким образом, флюсы служат для предварительной очистки металла (до начала процесса сварки или пайки), а также и для защиты его от реагирования с вредными составляющими окружающей среды (воздуха, горючей смеси пламени и др.).

При кислородной резке металлов флюсы выполняют другие функции. Они либо увеличивают тепловую эффективность действия кислородной струи, сгорая в ней и перегревая образующиеся на разрезаемом металле окислы для их расплавления и стекания, либо, химически связывая тугоплавкие окислы разрезаемого металла в более легкоплавкие, облегчают их стекание, либо механическим, абразивным воздействием облегчают их удаление.

Флюсы для сварки и пайки применяются в виде тонкоизмельченных порошков, которые вводят в реакционное пространство при самом процессе сварки (пайки) совместно с присадкой (припоем) либо насыпают на обрабатываемый, нагретый (расплавлен-

ный) металл, а иногда наносят предварительно в виде пасты на кромки перед их нагреванием или на добавочный металл.

Особым видом флюсования является применение газообразных флюсов при газовой сварке (наплавке), а также при печной и пламенной пайке.

Составы порошкообразных флюсов должны обеспечивать как физические характеристики расплавляющегося шлака (температура плавления, вязкость и др.), так и необходимое взаимодействие с обрабатываемым нагретым и расплавленным металлом и его окислами. Такие флюсы состоят из различных кислородсодержащих соединений, а также из хлористых и фтористых солей. В табл. IV.8 приведены некоторые флюсы, применяемые при сварке чугуна и сплавов на медной основе. Флюс № 7, применяемый при газовой низкотемпературной сварке чугуна, наносят в виде пасты, замешанной на керосине (15 см<sup>3</sup> на 100 г порошка).

Таблица IV.8

Некоторые флюсы для сварки меди, сплавов на ее основе и сварки чугуна в вес. ч.

Составляющие	ГОСТ или ТУ	Условные номера флюсов						
		для медных сплавов					для чугуна	
		1	2	3	4	5	6	7
Бура техническая	8429—57	50	60—70	—	—	68	50	18
Борная кислота	2629—44	35	20—10	50	—	—	—	—
Кислый фосфорнокислый натрий	—	15	—	—	—	15	—	—
Борный ангидрид	ТУ завода-изготовителя	—	—	—	35	—	—	—
Фторборат калия	—	—	—	—	23	—	—	—
Натрий углекислый безводный	83—41	—	—	—	—	—	—	25
Натрий азотнокислый	4168—55	—	—	—	—	—	—	56,5
Углекислый литий	—	—	—	—	—	—	—	0,5
Кислота кремниевая водная	4214—48	—	—	—	—	15	—	—
Натрий хлористый	4233—48	—	30—20	—	—	—	—	—
Калий фтористый	4522—48	—	—	50	42	—	—	—
Древесный уголь	—	—	—	—	—	2	—	—
Двууглекислый натрий	—	—	—	—	—	—	50	—

Флюсы для сварки и пайки алюминия, магния и их сплавов, как правило, не должны содержать окислов. Их типовые составы приведены в табл. IV.9.

Т а б л и ц а IV.9

Флюсы для сварки алюминия, магния и их сплавов

Составляющие	ГОСТ или ТУ	Условные номера флюсов						
		для алюминиевых сплавов					для магневых сплавов	
		8	9	10	11	12	13	14
Натрий хлористый	4233—48	28	19	45	30	30	14	—
Калий »	4568—49	50	29	30	45	43	30	—
Литий »	МПТУ 3043—51	14	—	11	15	—	8	—
Барий »	742—41	—	48	—	—	—	40	—
Цинк »	—	—	—	—	—	12	—	—
Натрий фтористый	4463—48	8	—	—	3,5	15	8	—
Калий »	4522—48	—	—	14	—	—	—	—
Литий »	ТУ завода- изготови- теля	—	—	—	3,5	—	—	11
Барий »	7168—54	—	—	—	—	—	—	39
Кальций »	7167—54	—	—	—	—	—	—	26
Магний »	ТУ завода- изготови- теля	—	—	—	—	—	—	22
Оксид магния	4526—48	—	—	—	—	—	—	2

Флюс № 8 (марка АФ-4А) широко используется в промышленности. В частности, кроме газовой сварки алюминиевых сплавов он применяется при аргоно-дуговой сварке вольфрамовым электродом алюминиевых бронз и дает хорошие результаты. При этом нанесение его в виде пасты на кромки свариваемых изделий со стороны, обратной непосредственному действию дуги, исключает дефекты сплавления, связанные с образованием тугоплавких пленок  $Al_2O_3$ .

Флюс № 12 является достаточно легкоплавким и применяется при газопламенной пайке алюминиевых сплавов припоем 34А (25—30% Cu; 4—7% Si; Al — остальное).

Флюс № 14 для сварки магниевых сплавов присадочными прутками марок МА-1 и МА-8 по сравнению с флюсом № 13 требует более высокой квалификации и специальных навыков сварщика (особенно при сварке тонкостенных деталей), но не вызывает коррозии при попадании в металл.

Все флюсы, имеющие значительное количество хлористых солей, особенно LiCl, гигроскопичны и должны храниться в герметизированной таре.

Флюсы, рассматриваемые в этом параграфе, изготавливают механическим смешиванием порошков исходных материалов или их предварительным сплавлением и последующим дроблением.

Перед смешиванием материалы тонко измельчают, причем большинство из них (кроме, например, ферросплавов, применяемых в виде добавок во флюсах для сварки нержавеющей стали, и др.) измельчают в фарфоровых мельницах или ступках. После развеса шихту усредняют в стеклянных паяных бочках и расфасовывают.

В качестве примера флюса, изготавливаемого сплавлением составляющих, можно привести специальный флюс для пайки нержавеющей высокохромистых сталей. Его состав: 53% борной кислоты; 47% фтористого калия (иногда сверх основного состава добавляется и 10% плавиковой кислоты). Измельченные исходные материалы расплавляют в печи при температуре  $\sim 800^\circ\text{C}$  до начала вскипания (появления «шапки»), выливают для затвердевания на очищенный лист из нержавеющей стали и в теплом состоянии кусками закладывают в эксикатор.

Большинство таких флюсов централизованно не поставляются и изготавливаются непосредственно потребителями.

Для газовой сварки латуней, ее наплавки на черные металлы, а также для пайки углеродистой стали, меди и сплавов на ее основе различными припоями с успехом применяется газообразный флюс БМ-1. Он представляет собой борорганическую жидкость, пары которой поступают в горелку вместе с ацетиленом и, сгорая в пламени, дают борный ангидрид  $\text{B}_2\text{O}_3$ , флюсующий окислы металла при его конденсации на поверхности достаточно равномерными количествами. Основу борорганической жидкости составляет метилборат — эфир борной кислоты  $\text{B}(\text{OCH}_3)_3$ .

Применение газообразных флюсов позволяет улучшить условия труда, в ряде случаев механизировать процесс, а также обеспечивает получение стабильной очистки металла в процессе сварки, наплавки или пайки.

Газообразные флюсы с успехом могут применяться и при печной пайке. Добавки таких флюсующих газов к водородным смесям или инертным газам, поступающим в печь, где производится нагрев и пайка, заметно активизируют очистку металла и могут не только стабилизировать качество пайки, но и снижают возможную минимальную температуру пайки.

В качестве таких газовых флюсов применяются боргалоидные соединения и  $\text{PCl}_3$ , добавляемые в небольших количествах (иногда до 0,01%) к основному инертному газу.

Флюсы для кислородной резки также представляют собой сыпучие смеси с размером частиц, определяемым обычно просевом на ситах 500—1500 *отв/см*<sup>2</sup>. Основу флюсов составляют горючие

## Флюсы для кислородной резки

Назначение флюса	Условный номер флюса	Содержание во флюсе в % вес.						
		железного порошка	алюминиевого порошка	алюминиево-магниевого порошка	силикокальция	ферро-фосфора	кварцевого песка	окалина
Для разделительной резки высокохромистых сталей	1	100	—	—	—	—	—	—
	2	—	—	—	—	—	100	—
	3	70—80	—	—	—	—	—	20—30
Для поверхностной резки высокохромистой стали	4	—	—	35—30	65—70	—	—	—
Для разделительной резки чугуна	5	65—75	5—10	—	—	—	—	20—25
Для разделительной резки меди и ее сплавов	6	70—75	15—20	—	—	10—15	—	—

порошки (железа, алюминия и др.). Некоторые флюсы имеют добавки в виде окалины и песка. Некоторые типовые составы таких флюсов приведены в табл. IV.10.

### § IV.5. Газы, применяемые при газопламенной обработке металлов

При газопламенной обработке металлов — сварке, пайке, кислородной резке, газопламенной местной термической обработке, металлизации и напылении — источником необходимого нагрева является пламя, получаемое сжиганием смеси горючего газа с кислородом.

Наиболее эффективным источником нагрева является пламя высококалорийных горючих газов, обеспечивающих высокую температуру при сгорании в кислороде.

Газообразный кислород, кроме составляющей в горючей смеси, используется в чистом виде при кислородной (пламенной и дуговой) резке, а также в виде добавок к различным защитным газам при дуговой сварке. Наиболее широко в сварочном производстве он применяется для кислородной резки металлов, в меньшей степени — для газовой сварки и других методов обработки и сварки.

Газообразный кислород ( $O_2$ ) при нормальной температуре и давлении бесцветен, не имеет вкуса и запаха. При температуре  $20^\circ C$  и нормальном давлении — 760 мм рт. ст.  $1 м^3$  кислорода весит 1,33 кг (при  $0^\circ C$  и том же давлении он весит

$\frac{32}{22,4} \approx 1,43 \text{ кг}$ ). Температура кипения жидкого кислорода при нормальном давлении —  $183^\circ \text{C}$  ( $90^\circ \text{K}$ ). Вес жидкого кислорода в этих условиях  $1,14 \text{ кг/л}$ . При испарении  $1 \text{ л}$  жидкого кислорода получается  $\sim 860 \text{ л}$  газообразного, отнесенного к температуре  $20^\circ \text{C}$  и давлению  $1 \text{ кг/см}^2$ .

При движении сжатого газообразного кислорода по поверхности масла или жира они воспламеняются.

Газообразный технический кислород, предназначенный для газопламенной обработки металлов, в соответствии с ГОСТом 5583—58 выпускается трех сортов: высшего ( $\text{O}_2 \geq 99,5\% \text{ об.}$ ), первого ( $\text{O}_2 \geq 99,2\% \text{ об.}$ ) и второго ( $\text{O}_2 \geq 98,5\% \text{ об.}$ ). Содержание влаги не должно превышать  $0,07 \text{ г/м}^3$ .

Кислород для промышленных целей получается из воздуха [10], посредством его очистки от пыли, углекислого газа и паров воды с последующим сжижением и отделением от азота в ректи-

#### Физические и тепловые

Горючий газ	Химическая формула	Плотность в $\text{кг/м}^3$ при $20^\circ \text{C}$ и давлении $760 \text{ мм рт. ст.}$	Нижшая теплотворная способность в тыс. $\text{ккал/м}^3$ при $20^\circ \text{C}$ и давлении $760 \text{ мм рт. ст.}$	Максимальная температура пламени в $^\circ \text{C}$ при рабочих соотношениях в горючей смеси
Ацетилен	$\text{C}_2\text{H}_2$	1,09	12,6	3200
Водород	$\text{H}_2$	0,084	2,4	2500
Оксид углерода	$\text{CO}$	1,16	2,8	2800
Метан	$\text{CH}_4$	0,67	8,0	2200
Этан	$\text{C}_2\text{H}_6$	1,27	14,4	2200
Пропан	$\text{C}_3\text{H}_8$	1,88	20,8	2750
Бутан	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	2,54	27,8	2500
Городские газы	—	0,85—1,05	4,4—6,5	2000—2300
Природные газы	—	0,7—0,9	7,5—9,0	$\sim 2100$
Нефтяные газы	—	0,6—1,37	7,0—14,8	$\sim 2200$
Сланцевые газы	—	0,7—1,00	3,0—3,4	1500—2000
Коксовые газы	—	0,4—0,55	3,5—4,4	$\sim 2000$
Пары бензина	$\text{C}_7\text{H}_{16}$	$\sim 0,72 \text{ кг/л}$	$\sim 10\,000 \text{ ккал/кг}$	2400
Пары керосина	$\text{C}_7\text{H}_{14}$	$\sim 0,8 \text{ кг/л}$	$\sim 10\,000 \text{ ккал/кг}$	2300

\* При нормальной регулировке пламени (при  $\frac{\text{O}_2}{\text{C}_2\text{H}_2} = 1,1$ ) скорость распространения



фикационных колоннах. Принцип отделения основан на различных температурах кипения азота ( $-196^{\circ}\text{C}$ , или  $77^{\circ}\text{K}$ ) и кислорода. Кислород доставляется потребителям либо в жидком состоянии, либо в газообразном. Газообразный кислород нагнетается в стальные баллоны (обычно водяной емкостью  $\sim 40\text{ л}$ ) под давлением  $150\text{ кг/см}^2$ . Доставка газообразного кислорода потребителям в баллонах экономически малоцелесообразна в связи с большим весом тары ( $\sim 70\text{ кг}$ ) в сравнении с весом транспортируемого газа ( $\sim 6\text{ м}^3$ , или  $\sim 8\text{ кг}$ ).

Относительный вес тары снижается примерно в 10 раз при транспортировке жидкого кислорода, поставляемого по ГОСТу 6331—52. При этом уменьшается и опасность транспортировки.

На заводе-потребителе жидкий кислород газифицируется в специальных газификаторах и по трубопроводам поступает к рабочим постам.

Таблица IV.11

свойства горючих газов

Пределы взрываемости (процент содержания горючего в смеси)		Высшая скорость распространения пламени в м/сек		Количество кислорода в $\text{м}^3$ на $1\text{ м}^3$ горючего газа	
с воздухом	с кислородом	в воздухе	в кислороде	для полного сгорания	подводимого в горелку (резак)
2,2—82,0	2,3—93,0	2,87	13,5 *	2,5	1,1—1,7
3,3—81,5	4,6—93,0	2,67	8,9	0,5	0,4
11,4—77,5	15,5—94,0	0,33	1,1	0,5	—
4,8—16,7	5,0—59,2	0,67	3,3	2,0	1,5
3,1—15,0	4,1—50,5	0,85	—	3,5	—
2,0—11,0	2,0—48,0	0,82	3,7	5,0	3,5
1,5—8,4	3,0—45,0	0,83	—	6,5	4,0
3,8—40,0	8,5—73,6	0,65	—	1,0—2,0	$\sim 1,0$
4,8—14,0	—	0,7	—	1,8—2,0	1,0—1,5
3,5—16,3	—	1,15	—	1,5—2,5	1,2—2,2
—	—	—	—	$\sim 0,8$	$\sim 0,65$
7,0—21,0	—	—	—	$\sim 1,0$	$\sim 0,7$
0,7—6,0	2,1—28,4	0,31	—	—	$\sim 2,5\text{ м}^3/\text{кг}$
1,4—5,5	—	—	—	—	$\sim 2,0\text{ м}^3/\text{кг}$

ния пламени  $\sim 7,2\text{ м/сек}$ .

Трубопроводы применяются и при централизованном снабжении постов газообразным кислородом из рампы, собранных из соответствующего количества баллонов, а также при наличии у завода-потребителя специальной кислородной станции. Кислородные трубопроводы низкого давления (до  $15 \text{ кг/см}^2$ ) монтируются из стальных газовых труб, среднего давления ( $16\text{—}30 \text{ кг/см}^2$ ) — из стальных цельнотянутых труб и высокого давления ( $>30 \text{ кг/см}^2$ ) — из мерных цельнотянутых труб. В зависимости от конкретных условий трубопроводы укладывают с наклоном для стекания сконденсированной воды к отстойникам, а также теплоизолируют для исключения ее замерзания при отрицательных температурах. Внутренний диаметр трубопроводов выбирают в зависимости от расхода газа и длины трубопровода, обычно он составляет  $5\text{—}15 \text{ мм}$ .

Прокладка трубопровода по кольцу обеспечивает лучшее газоснабжение постов в цехе.

Кислородные заводские станции и по устройству и по расположению на территории завода должны отвечать специальным требованиям и нормам.

В сварочном производстве применяются разнообразные горючие газы [11]. Некоторые основные характеристики различных горючих газов, используемых при газопламенной обработке, приведены в табл. IV.11. Наиболее универсальным горючим газом является ацетилен, остальные горючие газы рассматриваются как его заменители, хотя в ряде случаев (например, при кислородной резке) их применение предпочтительнее не только по экономическим, но и по техническим причинам (при замене ацетилена менее калорийными горючими газами происходит меньшее оплавление верхних кромок реза и др.) [9].

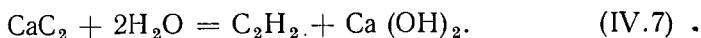
Ацетилен дает наиболее высокую температуру пламени. При распаде на углерод и водород он выделяет  $54 \text{ ккал/моль}$ , увеличивая температуру газов вблизи ядра пламени, получаемого в основном за счет сгорания углерода в СО. Догорание СО в СО<sub>2</sub> и Н<sub>2</sub> в Н<sub>2</sub>О при нормальной регулировке пламени ( $\frac{O_2}{C_2H_2} = 1 \div 1,3$ ) происходит главным образом в факеле пламени, температура которого ниже, а состав более окислительный.

Технический ацетилен имеет резкий запах, но бесцветен.

В большом объеме, при избыточном давлении более  $1,5 \text{ кг/см}^2$  и температуре более  $550^\circ \text{С}$  он распадается, чем может вызвать взрыв без внешнего воспламенения. При наличии катализаторов (окиси меди, железа и др.) он может взрываться при температуре выше  $220^\circ \text{С}$ . Весьма взрывоопасны смеси ацетилена с воздухом и кислородом.

Ацетилен либо поставляется потребителям заводами-поставщиками (специальными ацетиленовыми станциями), либо получается на месте потребления в специальных ацетиленовых гене-

раторах. Основным способом получения ацетилена является реакция карбида кальция с водой [64]



При этом выделяется значительное количество тепла (около 400 ккал на 1 кг  $\text{CaC}_2$ ). Отбор этого тепла в ацетиленовых генераторах осуществляется либо достаточным количеством балластной воды, либо его затратами на скрытую теплоту испарения ограниченного количества воды ( $\sim 0,6$  кг на 1 кг  $\text{CaC}_2$ ).

Полученный ацетилен охлаждается (обычно пропусканием через слой холодной воды), очищается от примесей (сероводород, фосфористый водород, пары воды) и через газосборник поступает либо на места потребления, либо для накачки в баллоны.

Из ацетиленовых генераторов относительно небольшой производительности ацетилен может поступать непосредственно к рабочим постам через предохранительные затворы. При снабжении ряда постов от централизованной станции или генератора большой производительности ацетилен поступает в трубопроводы. Между постами и трубопроводами также ставятся затворы.

С завода-поставщика ацетилен поступает потребителям в растворенном состоянии в баллонах. В этом случае он растворен в ацетоне, находящемся в пористой массе, наполняющей внутренний объем баллона. Обычно давление ацетилена в баллоне  $\sim 16$  кг/см<sup>2</sup>. В таком виде баллон с водяной емкостью  $\sim 40$  л содержит обычно  $\sim 5$  м<sup>3</sup> ацетилена. Растворенный ацетилен получается наиболее чистым. Однако транспортировка ацетилена в баллонах значительно увеличивает затраты потребителя на его получение.

Стоимость ацетилена вообще довольно значительна, так как изготовление карбида кальция осуществляется в электрических печах и требует больших затрат электроэнергии ( $\sim 5000$ — $6000$  квт·ч на 1 т  $\text{CaC}_2$ ). В зависимости от сорта карбида и его грануляции выход ацетилена из 1 кг карбида кальция, согласно ГОСТу 1460—56, может быть получен от 235 до 285 л. Карбид кальция поставляется в герметически закрытых железных барабанах развесом 50—130 кг. Раскупоривание барабанов должно производиться с предосторожностями, исключающими образование искр, могущих вызвать взрыв ацетилено-воздушной смеси.

Ацетиленовые станции на территории предприятий должны строиться с соблюдением соответствующих правил в целях обеспечения максимальной безопасности их эксплуатации.

Из заменителей ацетилена наиболее высокотемпературное пламя дают пропано-бутановые смеси при относительно большом количестве подаваемого в горелку кислорода ( $\frac{\text{O}_2}{\text{C}_3\text{H}_8} = 3,5$ , табл. IV.11). Такое пламя можно применять не только для подогрева при резке и местной термической обработке, но и для сварки легкоплавких металлов и сталей при их неболь-

шой толщине. Пропано-бутановые смеси (так называемый технический пропан) получают при переработке природных нефтяных газов и как побочный продукт при крекинг-процессе на нефтеперерабатывающих заводах. Технический пропан при повышенных давлениях (до  $25 \text{ кг/см}^2$ ) сжижается и транспортируется в специальных танках и баллонах. Температура кипения пропана равна  $-44,5^\circ \text{C}$ , а нормального бутана —  $+0,5^\circ \text{C}$ . Поэтому по мере расходования этой смеси из емкости состав газов изменяется, обогащаясь бутаном.

Снабжение рабочих постов техническим пропаном обычно осуществляется от централизованных пунктов, хотя возможно питание индивидуальных постов и от отдельных баллонов.

В качестве горючего для получения подогревательного пламени при кислородной резке в ряде случаев используются пары горючих жидкостей — бензина и керосина. Хотя пламя при использовании осветительного керосина имеет меньшую температуру, чем при использовании паров бензина, применение его в качестве горючего имеет преимущества в связи с большей безопасностью. Парами бензина и керосина пользуются исключительно при индивидуальном обслуживании этими горючими каждого отдельного поста.

Коксовый газ получается при сухой перегонке каменного угля и представляет собой смесь водорода, метана и окиси углерода. Его применение в основном целесообразно там, где он получается как побочный продукт производства, например на металлургических заводах. В качестве горючего он применяется при разделительной и поверхностной кислородной резке металлов. Обычно он поступает к рабочим постам по трубопроводам, хотя принципиально возможно его нагнетание в баллоны.

Для исключения загрязнения трубопроводов содержащимися в коксовом газе смолистыми веществами, а пламени — сернистыми соединениями, коксовый газ следует тщательно очищать от этих обычных для него примесей.

В различных случаях, главным образом когда не требуется специальной транспортировки горючих газов, при газопламенной обработке используются природные и городские газы (в основном состоящие из метана с различными добавками), пиролизные газы (продукты пиролиза нефтяных отходов и мазута), а также сланцевые и нефтяные газы. Их составы переменны в зависимости от исходного сырья и методов его переработки, в связи с чем характеристики, приведенные в табл. IV.11, имеют достаточно широкие пределы.

Значительно более стабильным по составу и свойствам является водород. Технический водород бесцветен и практически не имеет запаха. Он транспортируется в баллонах при давлении  $150 \text{ кг/см}^2$ . Качество и поставка водорода регламентируются ГОСТом 3022—45. В некоторых случаях, главным образом при малом объеме использования, водород может полу-

чатся и прямо потребителями в переносных генераторах за счет реакций кислот с металлами. В связи с большой взрывоопасностью такое получение водорода возможно только при соблюдении определенных правил безопасности.

Стоимость водорода довольно высока и применение его для газопламенной обработки металлов, пайки в печах, при атомно-водородной сварке и в других случаях должно быть достаточно обосновано.

Газы — заменители ацетиленов могут эффективно применяться для различных методов обработки только в случае определенного изменения их количеств, что требует соответствующего изменения технологической аппаратуры (резаков, горелок и т. п.) в отношении выбора проходных сечений, конструкций и материала мундштуков и пр. [9]. Коэффициенты замены ацетиленов другими горючими газами ( $k_2$ ) при разделительной резке перемещающимся пламенем (и при некоторых других видах нагрева) могут быть определены по соотношениям низшей теплотворной способности

$$k_2 = \frac{V_2}{V_a} \approx \frac{Q_a}{Q_2} = \frac{12600}{Q_2}, \quad (IV.8)$$

где  $Q_2$  — низшая теплотворная способность горючего газа при  $20^\circ \text{C}$  и давлении  $760 \text{ мм рт. ст.}$  (табл. IV.11).

Для газов, состоящих из нескольких горючих (например, водорода, метана и пр.),

$$Q_2 = 0,01 \sum Q_i r_i, \quad (IV.9)$$

где  $Q_i$  — низшая теплотворная способность элементарного газа, входящего в смесь;

$r_i$  — его содержание в составном газе в % об.

Отсюда получаем (по соотношениям, приведенным в табл. IV.11)

$$Q_2 = 24r_{\text{H}_2} + 80r_{\text{CH}_4} + 28r_{\text{CO}} + 200r_{\text{C}_2\text{H}_6}, \quad (IV.10)$$

где  $r_{\text{H}_2}$ ,  $r_{\text{CH}_4}$ ,  $r_{\text{CO}}$  и  $r_{\text{C}_2\text{H}_6}$  — соответственно содержание в составном газе водорода, метана, окиси углерода и пропана.

Соответственно возможен и подсчет необходимого количества кислорода, подаваемого в резак (горелку) для получения горючей смеси. В этом случае

$$\beta = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_2} = 0,01 [0,4 (r_{\text{H}_2} + r_{\text{CO}}) + 1,5r_{\text{CH}_4} + 3,5r_{\text{C}_2\text{H}_6} - r_{\text{O}_2}], \quad (IV.11)$$

где  $\beta$  — объемное количество кислорода по отношению к горючему газу в смеси;

$r_{\text{O}_2}$  — объемное содержание кислорода в составном газе.

Скорости распространения пламени для составных газов (относительно скорости распространения пламени в ацетилено-кисло-

## Области применения горючих газов для газопламенной обработки

Виды газопламенной обработки		Ацетилен	Пропан	Коксовый газ	Нефтяные газы	Природные газы	Сланцевые газы	Водород	Бензин	Керосин
Сварка тонколистовой стали, чугуна, меди, алюминия и их сплавов		+	+				-		+	
Сварка свинца, стекла				+				+	+	
Пайка с газопламенным нагревом		+	+	+	+	+		+	+	+
Поверхностная закалка		+	+	+	+				+	+
Напыление легкоплавких материалов			+	+		+				
Нагрев при правке, гибке и пр.		+	+	+	+	+		+	+	+
Кислородная резка	Разделительная									
	Машинная чистовая и заготовительная (вертикальная)	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	То же, со скосом кромок	+	+			+	-		+	+
	Ручная заготовительная и резка лома	+	+				-		+	+
	Резка стального литья, отрезка прибылей	+	+				-		+	+

Виды газопламенной обработки		Ацетилен	Пропан	Коксовый газ	Нефтяные газы	Природные газы	Сланцевые газы	Водород	Бензин	Керосин	
Кислородная резка	Разделительная	Резка при строительномонтажных работах	+	-	+		+	+	-	-	
		Резка больших (более 200 м ) толщин	+	+	+		+	-	+	+	
		Скоростная резка тонкого металла	+	+	+	+	+	-	-	+	+
		Кислородно-флюсовая резка	+	+	+		+				+
		Подводная резка	-		-			-	+	+	
	Поверхностная	Зачистка металлургическая обычная	+	+	+	+	+			+	
		То же, кислородно-флюсовая	+				+			+	
		Зачистка сплошная машинная	+		+		+			+	
		Вырезка отдельных канавок	+	+	+		+			+	+

Примечание. Плюс означает, что использование возможно; минус — использование не рекомендуется; пустые клетки — нет достаточных сведений.

родной смеси, принятой за единицу) также можно рассчитать по данным табл. IV.11. Скорость распространения пламени может быть приближенно подсчитана по формуле

$$S_0 = \frac{1,2r'_{H_2} + r'_{CH_4} + 0,14r'_{CO} + 3r'_{C_2H_2}}{r'_{H_2} + 2,3r'_{CH_4} + r'_{CO} + 6,1r'_{C_2H_2}} - 0,007 (r_{CO_2} + r_{N_2} + r_{O_2}), \quad (IV.12)$$

где  $r_{CO_2}$ ,  $r_{N_2}$  — объемное содержание в составном газе углекислого газа и азота;

$r'_a$  — объемное содержание элементарного газа  $a$  в горючей части составного газа.

По полученным значениям количества газов и скорости распространения пламени возможен расчет выходных отверстий мундштуков аппаратуры для газопламенной обработки металлов.

Области возможного применения различных горючих газов при разнообразных видах газопламенной обработки приведены в табл. IV.12.

## § IV.6. Инертные защитные газы

Как уже отмечалось, свойства ряда металлов и сплавов значительно ухудшаются при воздействии на них при высоких температурах кислорода, а часто азота и водорода. Одним из широко распространенных способов исключения такого воздействия является сварка в атмосфере инертных газов. Защиту реакционного сварочного пространства в этих случаях можно осуществить либо струей защитного инертного газа, оттесняющего воздух, либо сваркой в специальных камерах с созданной там атмосферой заданного состава.

Наиболее универсальными защитными газами являются аргон и гелий. Для защиты некоторых металлов, например меди, в качестве инертного газа может быть использован и азот [47].

В ряде случаев к инертным газам для улучшения устойчивости дугового разряда, улучшения перехода металла в ванну, формирования шва, увеличения производительности сварки, а также повышения плотности металла швов к инертным газам добавляют те или иные активные газы в количествах, допустимых по их металлургическому воздействию на металл в условиях сварки. В качестве подобных добавок применяют кислород, углекислый газ, азот и водород. Такие смеси следует рассматривать тоже как инертные газы, хотя это и не совсем точно.

Ниже приводятся некоторые физические свойства аргона и гелия:

	Ar	He
Атомный вес . . . . .	39,944	4,003
Плотность в $кг/м^3$ при $0^\circ C$ и давлении 1 $кг/см^2$ . . . . .	1,7833	0,1785
Температура кипения в $^\circ C$ . . . . .	-185,5	-268,9
Теплопроводность в $кал/см \cdot сек \cdot ^\circ C$ . . . . .	$0,378 \cdot 10^{-4}$	$3,32 \cdot 10^{-4}$
Потенциал ионизации в $v$ . . . . .	15,7	24,5



Аргон и гелий не образуют с другими элементами химических соединений \*, поэтому они и считаются инертными. В большинстве металлов эти газы практически нерастворимы.

Гелий добывается из природных газов посредством их сжижения после предварительной очистки от примесей (окиси и двуокиси углерода, метана и других углеводородов). Очистка от примесей азота осуществляется глубоким охлаждением. В гелии высокой чистоты и техническом, применяемом для сварки (по МРТУ 5177—66), остаются небольшие количества азота, водорода, кислорода, углеводородов, неона и влаги. Добывание гелия из воздуха нецелесообразно вследствие его малого количества (0,00046% об., или 0,00007% вес.).

Содержание аргона в воздухе довольно значительно (0,9325% об., или 1,2862% вес.), поэтому промышленное производство его основано на получении из воздуха. При этом, так как  $T_{кипN_2} < T_{кипAr} < T_{кипO_2}$ , его отделение от этих основных составляющих воздуха производится методами ректификации в разделительных колоннах. Полученный таким образом «сырой» аргон содержит все же значительное количество примесей, в частности кислорода. Дальнейшая очистка его осуществляется бесплатным соединением кислорода с добавляемым водородом в присутствии катализаторов. В чистом аргоне в качестве примесей остаются небольшие количества азота, кислорода и влаги. В табл. IV.13 приведены составы различных сортов аргона (А, Б, В), поставляемых согласно ГОСТу 10157—62, а также некоторые наиболее распространенные смеси с аргоном (Г, Д, Е).

Аргон сорта А предназначен для сварки химически активных металлов (титана, циркония, ниобия), сплавов на их основе, а также для сварки алюминиевых сплавов плавящимся электродом и в некоторых случаях выполнения ответственных работ.

Аргон сорта Б рекомендуется для сварки неплавящимся электродом сплавов алюминия, магния и других, чувствительных к примесям кислорода и азота.

Аргон сорта В рекомендуется для сварки нержавеющей сталей различных классов и некоторых других металлов.

С точки зрения защитных свойств аргона и гелия при сварке со струйной защитой приходится учитывать их различные физические свойства. Аргон, являясь более тяжелым, чем воздух, своей струей лучше защищает металл при наиболее обычной сварке в нижнем положении. Растекаясь по поверхности свариваемого изделия, он защищает достаточно длительно довольно широкую и протяженную зону как расплавленного, так и нагретого при сварке металла. Гелий в 10 раз легче аргона, поэтому струя гелия менее полно защищает металл. В связи с этим обычно диаметр сопел горелок при защите струей гелия приходится брать

\* За исключением некоторых гидридов, причем в очень узком температурном интервале.

## Химический состав различных марок аргона

Составляющие газа	Составляющие по сортам в % об.					
	А	Б	В	Г	Д	Е
Аргон	$\geq 99,99$	$\geq 99,96$	$\geq 99,90$	95—97	50—90	35—40
Азот	$\leq 0,01$	$\leq 0,04$	$\leq 0,10$	—	—	—
Кислород	$\leq 0,003$	$\leq 0,005$	$\leq 0,005$	3—5	—	—
Водород	—	—	—	—	10—50	—
Влага (для несжатого газа) в г/м <sup>3</sup> , не более	0,03	0,03	0,03	0,07	0,07	0,07
Гелий	—	—	—	—	—	60—65

больше, чем при аргоне, и его расход увеличивается в сравнении с аргонем в 2—3 раза.

В случае потолочной сварки или необходимости дополнительной защиты швов, свариваемых в нижнем положении с обратной стороны (что в ряде случаев необходимо при сварке титановых сплавов и других химически активных металлов, поглощающих азот и кислород не только в расплавленном состоянии, но и в твердом при нагреве выше некоторой температуры), гелий становится предпочтительнее аргона.

Однако не только защитные свойства аргона и гелия различны. Различными являются и характеристики дуги в этих газах. Так, при одинаковой силе тока напряжение дуги в гелии при электродах W—Me, Al—Al, Ti—Ti значительно выше \*, чем дуги в аргоне. Такая дуга имеет большую проплавляющую способность и менее концентрирована (создает иную форму проплавления, более равномерную, в то время как дуга в аргоне при сварке, например, титановых сплавов вольфрамовым электродом дает большое проплавление в центре и значительно меньшее по краям ванны). Перепад напряжения в столбе дуги в гелии больше, чем в аргоне, поэтому изменение длины дуги заметнее сказывается на напряжении и общей ее теплоэффективности.

В зависимости от применения аргона или гелия меняется и поверхностное натяжение на границе металл—газовая фаза. Так, для хромоникелевых сталей аустенитного класса поверхностное натяжение жидкого металла при сварке в гелии заметно меньше, чем в аргоне. Это сказывается и на формировании поверхности швов. Более плавные переходы от шва к основному металлу при сварке в гелии имеют место и для других металлов, в част-

\* Напряжение дуги в гелии между железными электродами очень низкое, примерно около 8—10 в при сварке плавящимся голым электродом.

ности титановых сплавов, и в ряде случаев оказывают влияние на некоторые характеристики работоспособности сварных соединений.

В связи с изложенным иногда целесообразно применение аргоно-гелиевых смесей (например, сорта Е, согласно табл. IV.13). Например, при сварке алюминия в смеси ~40% Аг и 60% Не швы получаются более плотными, чем при сварке с защитой только аргоном [47].

В некоторых случаях к инертным газам целесообразно добавлять в небольших количествах активные газы. Так, при сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей плавящимся электродом добавка к аргону 3—5%  $O_2$  (или 10%  $CO_2$ ) снижает критическое значение сварочного тока, при котором осуществляется переход от крупнокапельного переноса металла в дуге к струйному. Это способствует улучшению сплавления, уменьшает подрезы, увеличивает производительность сварки и позволяет получать более плотные беспористые швы. Пористость особенно часто появляется при сварке тонколистового металла.

В целях увеличения напряжения дуги, а также ее теплоэффективности используются аргоно-водородные смеси (~15%  $H_2$ ). Однако при этом необходимо учитывать возможность вредного влияния растворяющегося в металле водорода.

При сварке меди и некоторых сплавов на ее основе плавящимся электродом применяются смеси аргона с азотом (20—30%  $N_2$ ), что увеличивает тепловую мощность дуги.

Азот при сварке меди может применяться как инертный газ, (он не растворяется в меди и не реагирует с ней). Тепловая мощность дуги при защите азотом значительно больше, чем при защите дуги аргоном. Однако следует учитывать, что вольфрамовые электроды являются нестойкими в атмосфере технического азота, поставляемого промышленностью и содержащего до 3—4%  $O_2$ . Такое количество кислорода при сварке медных сплавов плавящимся электродом не вызывает недопустимого ухудшения свойств металла швов, но при сварке вольфрамовым электродом приводит к его окислению, плавлению и попаданию в ванну включений вольфрама. Стойкость вольфрамовых электродов с торием значительно выше, чем чисто вольфрамовых, но тоже недостаточна. В этих случаях требуется либо дополнительная очистка азота от кислорода, либо применение специальных горелок с комбинированной газовой защитой. При такой защите вольфрамовый электрод омывается маломощной струей аргона, предохраняющего его от непосредственного контакта с азотом, а основная защитная струя, защищающая сварочную ванну и нагретый конец присадочного металла, формируется из азота. Такая защита целесообразна и по техническим, и по экономическим соображениям.

Рекомендации по применению инертных защитных газов и смесей их с активными газами для сварки различных металлов и сплавов приведены в табл. IV.14 [47].

**Выбор состава защитных газов для сварки различных металлов  
и сплавов.**

Свариваемый металл	Толщина в мм	Защитный газ при сварке	
		вольфрамовым электродом	плавящимся электродом
Низкоуглеродистая сталь *	$\leq 2,0$	Комбинированная защита (Ar; CO <sub>2</sub> )	Ar + 10% CO <sub>2</sub> Ar (сорт Г)
Низко- и среднелегированные стали *	$\leq 3,0$	Комбинированная защита (Ar; CO <sub>2</sub> ) Ar (сорт В)	Ar + 10% CO <sub>2</sub> Ar (сорт Г)
	$\geq 3,0$	—	Ar (сорт Г)
Нержавеющие хромоникелевые высоколегированные стали *	$\leq 3,0$	Ar (сорт В) He Комбинированная защита (Ar; CO <sub>2</sub> )	Ar (сорт В, Г) He Ar + 10% CO <sub>2</sub>
	$\geq 3,0$	—	Ar (сорт В, Г) He
Жаропрочные хромоникелевые сплавы	Любая	Ar (сорт Б) He	Ar (сорт Б) He
Алюминий и алюминиевые сплавы	$\leq 10,0$	Ar (сорт Б)	Ar (сорт А, Б)
	$\geq 10,0$	Ar (сорт Б)	Ar (сорт Б) Ar + 60% He
Магниеые сплавы	Любая	Ar (сорт Б) He	Ar (сорт А, Б)
Титан и его сплавы		Ar (сорт А)	Ar (сорт А)

Свариваемый металл	Толщина в мм	Защитный газ при сварке	
		вольфрамовым электродом	плавящимся электродом
Цирконий, молибден, ниобий и другие химически активные металлы	Любая	Ar (сорт А)	Ar (сорт А)
Медь и сплавы на ее основе		Ar (сорт В) He Комбинированная защита (Ar; N <sub>2</sub> )	Ar (сорт В) He N <sub>2</sub> Ar + (20—30)% N <sub>2</sub>

\* Возможно применение в активных защитных газос (см. § 7 этой главы).

Инертные газы поставляются в баллонах, конструктивно подобных кислородным. Баллоны с аргоном, гелием и азотом отличаются цветом и надписью. Нагнетание баллонов газом производится при давлении  $150 \text{ кг/см}^2$ .

Для исключения попадания воздуха и влаги в баллоны их запрещается использовать до полного снижения избыточного давления. При наличии остаточного давления, равного  $3—5 \text{ кг/см}^2$ , такое попадание в баллон воздуха и влаги маловероятно, и при последующем наполнении инертный газ будет иметь чистоту, обеспечиваемую поставщиком.

Газовые смеси могут быть получены и непосредственно потребителями, путем смешивания исходных продуктов. При этом количественные их соотношения устанавливаются посредством отдельных редукторов и измеряются ротаметрами, отградуированными каждый под соответствующий газ. Общая схема получения таких газовых смесей и питания ими сварочной горелки приведена на рис. IV.6. При необходимости добавок относительно небольших количеств газа (примерно до 10% в смеси) следует применять ротаметры с эбонитовым поплавком, позволяющие точнее измерять небольшие потоки газа.

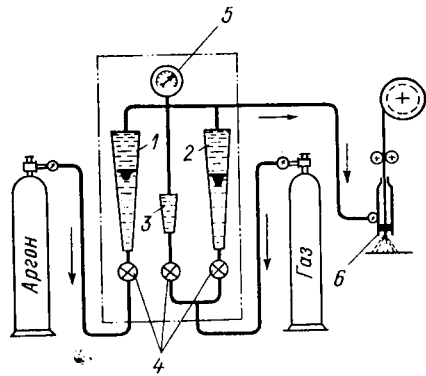


Рис. IV.6. Схема питания горелки газовой смесью:

1, 2 — ротаметры РС-3; 3 — ротаметр РС-3А;  
4 — вентили; 5 — манометр; 6 — сварочная горелка

Обычные расходы инертных защитных газов при дуговой сварке зависят от свариваемого металла, способа и режима сварки. Относительно большие расходы характерны для сварки плавящимся электродом, особенно при больших силах сварочного тока.

При ручной и механизированной сварке вольфрамовым электродом расход аргона через горелку, как правило, составляет 6—25 л/мин. Расход аргона при сварке плавящимся электродом в зависимости от свариваемого металла и силы сварочного тока обычно составляет 15—60 л/мин. Кроме того, при сварке химически активных металлов, например титана и его сплавов, оказывается необходимым защищать уже закристаллизовавшийся металл шва и его нагретые зоны вблизи шва, что достигается специальными дополнительными устройствами, механически связанными с головкой горелки. В эти устройства также подается защитный газ — 20—60% от его количества, подаваемого в защитную струю. В ряде случаев необходима защита от окисления и азотирования при сварке металла не только со стороны действующего источника тепла, но и с обратной стороны. Такая защита также может обеспечиваться дополнительной струей инертного газа, причем его расход составляет ~50% от расхода сварочной горелки.

#### § IV.7. Химически активные защитные газы

В ряде случаев более перспективным при дуговой сварке, главным образом плавящимся электродом, является использование химически активных защитных газов. Наиболее распространенным активным защитным газом является углекислый газ —  $\text{CO}_2$ . Действительно, как это показано в гл. III, при сварке электродами с покрытиями фтористо-кальциевого типа газовая фаза, выделяемая при сварке, состоит из  $\text{CO}_2$  (от распада карбонатов) и паров металла. Эта газовая фаза оттесняет основные массы воздуха, защищает металл от азотирования, но приводит к некоторому его окислению (главным образом за счет диссоциации  $\text{CO}_2$ ), которое может быть исключено рациональным введением раскислителей. Эта идея была реализована К. В. Любавским и Н. М. Новожиловым применительно к использованию углекислого газа в качестве защитного при дуговой механизированной сварке плавящимся голым электродом [44]. При этом из сопла (мундштука) горелки, охватывающего поступающую в дугу голую электродную проволоку, вытекает струя  $\text{CO}_2$ , достаточная для оттеснения воздуха от реакционной зоны сварки. Эти защитные свойства струи, как уже указывалось в предыдущем параграфе, зависят от физических свойств газа, в частности от соотношений его плотности и плотности воздуха. В этом отношении углекислый газ обладает достаточно хорошими характеристиками:

	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Молекулярный вес . . . . .	44,0	2,0
Плотность в кг/м <sup>3</sup> при 20° С и давлении 1 кг/см <sup>2</sup> . . . . .	1,977	0,089
Нормальная температура кипения в °С . . . . .	-78,9	-212,0
Теплопроводность в кал/см·сек·°С . . . . .	0,38 · 10 <sup>-4</sup>	4,72 · 10 <sup>-4</sup>
Удельная теплоемкость при 2000° С в кал/г . . . . .	0,328	4,16
Наименьший потенциал ионизации в в . . . . .	14,3	13,5

Значения удельной теплоемкости приведены без учета диссоциации.

Плотность углекислого газа достаточно высока, приблизительно в 1,5 раза больше плотности воздуха, что позволяет обеспечить защиту реакционного пространства дуги от воздуха при относительно небольших расходах углекислого газа в струе. Степень защиты можно определить по изменению приращения в наплавленном металле азота, сравнить его конечное содержание в металле шва и исходное содержание в проволоке.

На рис. IV.7 показана зависимость содержания азота в металле шва от расхода углекислого газа при сварке стали марки 1Х18Н9Т соответствующей электродной проволокой

(сила тока 235—250 а, диаметр газового сопла 16 мм) [44]. Как следует из этой зависимости, расход CO<sub>2</sub> уже около 600 л/ч (т. е. 10 л/мин) обеспечивает достаточную защиту реакционного пространства от азота воздуха. На этом же рисунке приведено и конечное содержание в металле титана, которое тоже стабилизируется примерно при расходе CO<sub>2</sub> в струе 600—800 л/ч. Хотя эта зависимость менее характерна в связи с воздействием на титан и кислорода, который выделяется самим защитным газом, но она показывает несколько меньшую окислительную способность углекислого газа, чем воздуха.

Обычно расходы углекислого газа в струе устанавливаются с некоторым запасом, т. е. несколько больше, чем показано в этом примере, и находятся на уровне ~1 м<sup>3</sup>/ч при обычных режимах сварки.

Наблюдающееся при сварке в углекислом газе окисление металла может быть нейтрализовано применением электродной проволоки, содержащей необходимое количество раскислителей. При сварке сталей, не имеющих в своем составе достаточного количества элементов, которые могли бы выступать как раскисли-

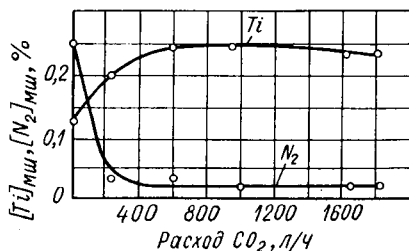


Рис. IV.7. Изменение содержания титана и азота в металле шва в зависимости от расхода CO<sub>2</sub> (сварка стали 1Х18Н9Т)

тели, например обычных низкоуглеродистых, раскисление осуществляется применением электродных проволок с  $\sim 0,8\%$  Si и  $1,2\text{—}2,2\%$  Mn или дополнительным введением флюсов, шлакующих окислы. Эти флюсы могут вводиться в шихту специальных порошковых проволок, предназначенных для сварки в углекислом газе, либо отдельно, в виде магнитных флюсов-порошков, налипающих на электродную проволоку при ее выходе из мундштука горелки [69]. В настоящее время как для сварки низкоуглеродистых, так и некоторых легированных сталей разработаны составы электродных проволок, которые позволяют в достаточной степени раскислять металл сварочной ванны с удалением большинства неметаллических включений из металла шва (см. § II.6).

В связи с удобством механизации сварки в атмосфере углекислого газа полуавтоматическая сварка тонкой проволокой обычных низкоуглеродистых сталей широкого диапазона толщин, а также некоторых легированных сталей получила широкое распространение и в СССР, и за границей.

Хорошее качество швов, в том числе и отсутствие в них недопустимой пористости, может быть достигнуто при выполнении соответствующих требований к защитному газу. При этом наиболее вредным является содержание в нем воды и азота воздуха.

Двуокись углерода  $\text{CO}_2$  (часто упрощенно называемая углекислотой) — широко применяемый продукт во всех агрегатных состояниях: газообразном (углекислый газ), жидком и твердом. Промышленное производство углекислого газа основано на его извлечении из газов, получающихся при действии серной кислоты на мел, обжиге известняка ( $\sim 40\%$   $\text{CO}_2$ ), сжигании кокса и антрацита в специальных топках (до  $18\%$   $\text{CO}_2$ ), из дымовых газов обычных котельных установок (до  $12\%$   $\text{CO}_2$ ), из газов брожения пищевых продуктов и в других производствах. Себестоимость углекислого газа в связи с этим может изменяться в широких пределах (в 3—5 раз).

Углекислота при нормальном давлении может находиться либо в газообразном состоянии, либо в твердом при температуре ниже  $-78,9^\circ\text{C}$  (сухой лед). В жидком состоянии ее можно получить только при повышенном давлении. Для использования потребителями наиболее удобна поставка ее в виде жидкости. Жидкая углекислота бесцветна. Ее удельный вес значительно изменяется в зависимости от величины давления (табл. IV.15).

При испарении 1 л жидкой углекислоты при  $0^\circ\text{C}$  и давлении 760 мм рт. ст. получается 506,8 л газа. В стандартный баллон с водяной емкостью 40 л заливается 25 кг жидкой углекислоты, которая при нормальном давлении занимает 67,5% объема баллона и дает при испарении  $\sim 12,5\text{ м}^3$  газа. В верхней части баллона вместе с газообразной углекислотой скапливается воздух. Вода, как более тяжелая, чем жидкая углекислота, собирается в нижней



## Свойства углекислоты при различных давлениях и температуре

Температура в °С	Давление в кг/см <sup>2</sup>	Удельный объем		Энтальпия в ккал/кг	
		жидкости в л/кг	пара в м <sup>3</sup> /кг	жидкости	пара
-50	6,97	0,867	0,0554	75,01	155,57
-30	14,55	0,931	0,0270	84,19	156,56
-10	26,99	1,02	0,0142	94,09	156,60
0	35,54	1,08	0,0104	100,00	156,13
+10	45,95	1,17	0,0075	106,50	154,59
+20	58,46	1,30	0,0053	114,00	151,10
+31 (критиче- ская)	74,96	2,16	0,0022	133,50	133,50

части баллона. В связи с этим чистота газов, взятых из баллона, зависит от его расположения в момент взятия пробы. Пробы, взятые из горизонтально расположенного баллона, более загрязнены.

Для сварочных целей обычно применяется углекислота, поставляемая по разработанному ЦНИИТмашем техническим условиям, хотя с определенными дополнительными приемами очистки можно пользоваться и пищевой углекислотой. Требования к чистоте и влажности различных сортов сжиженного углекислого газа приведены в табл. IV.16.

Таблица IV.16

## Чистота и влажность различных сортов сжиженного углекислого газа

Наименование показателей	Сорт углекислого газа		
	Пищевой, ГОСТ 8050-56	Пищевой осушенный	Сварочный, ТУ ВНИ и ЦНИИТмаша
Содержание CO <sub>2</sub> в % об. (не менее)	98,5 *	98,5 *	99,5 **
Содержание воды в свободном состоянии в % вес. (не более)	0,1	Отсутствует	Отсутствует
Содержание водяных паров в газе (точка росы в °С)	Не определяется	Не определяется	-34,0

\* Определяется при горизонтальном расположении баллона.  
\*\* Определяется из вертикального баллона (из газовой фазы).

При использовании пищевой углекислоты в баллонах для удаления примесей воздуха рекомендуется выпускать первые порции газа в атмосферу, а также после отстаивания баллона в перевернутом положении (вентилем вниз) воду, осторожно открывая вентиль. После удаления воды и первых загрязненных объемов газовой фазы такая пищевая углекислота дает достаточно удовлетворительные результаты при сварке.

В связи с большими расходами углекислого газа на сварочные цели на ряде предприятий организуется централизованное распределение его от рампы. Однако и это не всегда достаточно целесообразно. Значительно более удобной является доставка жидкой углекислоты потребителями в специальных цистернах, ее перелив в стационарные устройства большой емкости и подача из них паров углекислоты по специальным трубопроводам к рабочим постам. В настоящее время есть несколько проектов таких решений и накапливается опыт по наиболее рациональной схеме газоснабжения углекислым газом сварочных постов.

Так же как при использовании инертных защитных газов, иногда оказываются полезными добавки к углекислому газу. Так, в ряде случаев оказывается полезной добавка в защитному углекислому газу кислорода. Смеси  $\text{CO}_2$  с 10 и даже 20% кислорода при соответствующих составах электродных проволок широко применяются в Японии и некоторых других странах. При этом считается, что такие смеси обеспечивают более стабильные свойства, особенно в условиях большой влажности атмосферы при сварке. Эти смеси принципиально могут получаться теми же средствами, что и смеси с инертными газами (см. рис. IV.6). Централизованной поставки смесей углекислого газа с кислородом в нашей стране нет.

В числе активных газов, применяемых в качестве защитных при дуговой сварке, следует отметить водород, водородсодержащие смеси и водяной пар.

Водород использовался в качестве защитного газа еще при первых попытках защиты дугового пространства от воздуха. Однако, как отмечалось ранее (гл. II), водород может оказать в ряде случаев вредное воздействие. Поэтому его использование в дальнейшем было значительно ограничено. В чистом виде (и в виде водородно-азотных смесей, получаемых при диссоциации аммиака) он в настоящее время применяется при атомноводородной сварке (хотя и сам этот способ заменен теперь другими, в частности дуговой в защитных инертных газах).

Некоторые свойства водорода приводились ранее. Водород интенсивно диссоциирует при температурах дуги, потребляя значительное количество тепла ( $103,6 \text{ ккал/моль}$ ), что приводит к значительному увеличению напряжения дуги. Она становится устойчивой только при повышении напряжения источника тока. Так, например, при режимах атомноводородной сварки наиболее эффективной «звонящей» дугой при вольфрамовых

электродах и силе тока 20—40 а напряжение дуги составляет около 100 в, а напряжение холостого хода питающего источника должно быть не менее 200—220 в (обычно около 300 в). В этом случае водород является не только защитным газом, но и переносит тепловую энергию из дуги на поверхность не включенного в цепь тока изделия. Ассоциация атомарного водорода на холодной поверхности металла (в том числе и расплавленной, так как температура плавления большинства металлов ниже температуры возможного существования заметных количеств атомарного водорода) приводит к выделению тепла, потребленного в дуге на диссоциацию.

Аналогично может использоваться и диссоциированный аммиак.

Несмотря на то, что атмосфера, окружающая металл, при атомноводородной сварке представляет собой смесь молекулярного и атомарного водорода, при отсутствии на металле значительного количества окислов швы получаются достаточно плотными и применительно к низкоуглеродистой стали не имеют большого количества диффузионно-подвижного и остаточного водорода.

В других случаях применение водорода и водородсодержащих газов как защитных при дуговой сварке нецелесообразно.

При струйной защите иногда используется водяной пар. Однако в этом случае получается значительно меньшая стабильность качества сварных швов, чем при сварке с защитой дуги углекислым газом. В связи с этим такой процесс широкого распространения не получил.

Наиболее распространенным из активных защитных газов при дуговой сварке в настоящее время является углекислый газ и его смеси с добавками кислорода.

МАРКИ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ В % СТАЛЬНОЙ

Марка стали		Содержание				
		C	Mn	Si	Cr	Ni
Углеродистая	Св-08	≤0,10	0,35— 0,60	≤0,03	≤0,15	≤0,30
	Св-08А	≤0,10	0,35— 0,60	≤0,03	≤0,10	≤0,25
	Св-08ГА	≤0,10	0,80— 1,10	≤0,03	≤0,10	≤0,25
	Св-10ГА	≤0,12	1,10— 1,40	≤0,03	≤0,20	≤0,30
	Св-10Г2	≤0,12	1,50— 1,90	≤0,03	≤0,20	≤0,30
Легированная	Св-08ГС	≤0,10	1,40— 1,70	0,60— 0,85	≤0,20	≤0,25
	Св-08Г2С	≤0,11	1,80— 2,10	0,70— 0,95	≤0,20	≤0,25
	Св-12ГС	≤0,14	0,80— 1,10	0,60— 0,90	≤0,20	≤0,30
	Св-10ХГ2С	0,06— 0,12	1,7—2,1	0,70— 0,95	0,70— 1,00	≤0,25
	Св-10ГСМТ	0,08— 0,14	1,00— 1,30	0,40— 0,70	≤0,30	≤0,30
	Св-12Г2Х	0,10— 0,15	1,60— 1,90	≤0,30	1,2—1,5	≤0,25
	Св-08ХНМ	≤0,10	0,50— 0,80	0,12— 0,35	0,70— 0,90	0,80— 1,20
	Св-10НМ	≤0,12	0,40— 0,70	0,12— 0,35	≤0,20	1,00— 1,50
	Св-08ХН2М	≤0,10	0,55— 0,85	0,12— 0,35	0,70— 1,00	1,40— 1,80
	Св-18ХГСА	0,15— 0,22	0,80— 1,10	0,90— 1,20	0,80— 1,10	≤0,30
	Св-18ХМА	0,15— 0,22	0,40— 0,70	0,12— 0,35	0,80— 1,10	≤0,30
	Св-10ХМ	≤0,12	0,40— 0,70	0,12— 0,35	0,80— 1,10	0,80— 1,10
	Св-10МХ	≤0,12	0,40— 0,70	0,12— 0,35	0,45— 0,65	0,45— 0,65
	Св-08ХГ2СМ	≤0,10	1,40— 1,80	0,60— 0,90	0,80— 1,10	≤0,30
	Св-10ХМТФ	0,07— 0,12	0,40— 0,70	≤0,35	1,4—1,8	≤0,30

СВАРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ (ГОСТ 2246—60)

элементов, %

Mo	W	Ti	V	S	P	Прочие элементы
				не более		
—	—	—	—	0,04	0,04	—
—	—	—	—	0,03	0,03	—
—	—	—	—	0,03	0,03	—
—	—	—	—	0,03	0,03	—
—	—	—	—	0,04	0,04	—
—	—	—	—	0,03	0,03	Al ≤ 0,05
—	—	—	—	0,03	0,03	Al ≤ 0,05
—	—	—	—	0,03	0,03	—
—	—	—	—	0,03	0,03	Al ≤ 0,05
0,20—0,40	—	0,05— 0,12	—	0,03	0,03	—
—	—	—	—	0,03	0,03	—
0,25—0,45	—	—	—	0,03	0,03	—
0,40—0,55	—	—	—	0,03	0,03	—
0,20—0,40	—	—	—	0,03	0,03	—
—	—	—	—	0,025	0,03	—
0,15—0,30	—	—	—	0,025	0,03	—
0,40—0,60	—	—	—	0,03	0,03	—
0,40—0,60	—	—	—	0,03	0,03	—
0,40—0,60	—	—	—	0,03	0,03	—
0,40—0,60	—	0,05— 0,12	0,05—0,35	0,03	0,03	—

Марка стали		Содержание				
		C	Mn	Si	Cr	Ni
Легированная	Св-08ХГСМФ	≤0,10	1,20— 1,60	0,60— 0,90	0,95— 1,25	≤0,30
	Св-08ХМФ	≤0,10	0,40— 0,70	0,12— 0,35	1,00— 1,40	≤0,30
	Св-08ХМФБ	≤0,10	0,40— 0,70	0,12— 0,35	1,10— 1,50	≤0,30
	Св-08ХЗГ2СМ	≤0,10	2,0—2,5	0,45— 0,75	2,0—3,0	≤0,30
	Св-03Х2МТФ	0,10— 0,15	0,40— 0,70	≤0,35	1,7—2,2	≤0,30
	Св-08ХЗМФБ	≤0,10	0,40— 0,70	0,12— 0,35	2,20— 2,60	≤0,30
	Св-10Х5М	≤0,12	0,40— 0,70	0,12— 0,35	4,0—6,0	≤0,30
	Св-06НЗА	≤0,08	0,40— 0,70	≤0,30	≤0,30	3,0—3,5
Высоколегированная	Св-10Х11МФН	0,08— 0,15	0,35— 0,65	0,25— 0,55	10,50— 12,00	0,60— 0,90
	Св-10Х11ВМФН	0,08— 0,13	0,35— 0,65	0,30— 0,60	10,50— 12,00	0,80— 1,10
	Св-06Х14	≤0,08	0,30— 0,70	0,30— 0,70	13,0— 15,0	≤0,60
	Св-10Х13	0,08— 0,15	0,30— 0,70	0,30— 0,70	12,0— 14,0	≤0,60
	Св-08Х14ГТ	≤0,10	0,90— 1,30	0,25— 0,65	13,0— 15,0	≤0,60
	Св-10Х17Т	≤0,12	≤0,7	≤0,8	16,0— 18,0	≤0,60
	Св-13Х25Т	≤0,15	≤0,8	≤1,0	23—27	≤0,60
	Св-02Х19Н9	≤0,04	1,00— 2,00	0,50— 1,00	18,0— 20,0	8,0— 10,0
	Св-04Х19Н9	≤0,06	1,00— 2,00	0,50— 1,00	18,0— 20,0	8,0— 10,0
	Св-04Х19Н9С2	≤0,06	1,00— 2,00	2,00— 2,75	18,0— 20,0	8,0— 10,0
	Св-06Х19Н9Т	≤0,08	1,00— 2,00	0,40— 1,00	18,0— 20,0	8,0— 10,0
	Св-05Х19Н9Ф3С2	≤0,07	1,00— 2,00	1,30— 1,80	18,0— 20,0	8,0— 10,0
	Св-07Х18Н9Т10	≤0,09	≤2,0	≤0,80	17,0— 19,0	8,0— 10,0
	Св-08Х19Н9Ф2С2	≤0,10	1,0—2,0	1,3—1,8	18,0— 20,0	8,0— 10,0
	Св-08Х19Н10Б	0,05— 0,10	1,20— 1,70	≤0,70	18,5— 20,5	9,0— 10,5
	Св-04Х19Н11М3	≤0,06	1,00— 2,00	≤0,60	18,0— 20,0	10,0— 12,0
	Св-10Х16Н25М6	0,08— 0,12	1,00— 2,00	≤0,60	15,0— 17,5	24,0— 27,0

элементов, %

	Mo	W	Ti	V	S	P	Прочие элементы
					не более		
0,50—0,70	—	—	—	0,20—0,40	0,03	0,03	—
0,60—0,80	—	—	—	0,15—0,35	0,03	0,03	—
0,70—0,90	—	—	—	0,15—0,35	0,03	0,03	Nb=0,10÷0,35
0,30—0,50	—	—	—	—	0,03	0,03	—
0,40—0,60	—	—	0,05—0,12	0,15—0,35	0,03	0,03	—
0,60—0,80	—	—	—	0,15—0,35	0,03	0,03	Nb=0,20—0,50
0,40—0,60	—	—	—	—	0,03	0,03	—
—	—	—	—	—	0,025	0,03	—
0,60—0,90	—	—	—	0,25—0,50	0,03	0,03	—
1,00—1,30	1,00—1,40	—	—	0,25—0,50	0,03	0,03	—
—	—	—	—	—	0,03	0,03	—
—	—	—	—	—	0,03	0,03	—
—	—	0,60—1,00	—	—	0,03	0,03	—
—	—	≤0,5	—	—	0,03	0,035	—
—	—	≤0,5	—	—	0,03	0,035	—
—	—	—	—	—	0,018	0,025	—
—	—	—	—	—	0,018	0,025	—
—	—	—	—	—	0,018	0,025	—
—	—	0,50—1,00	—	—	0,018	0,030	—
—	—	—	2,20—2,70	—	0,025	0,030	—
—	—	1,0—1,4	—	—	0,015	0,03	Al=0,6÷0,95
—	—	—	1,8—2,4	—	0,025	0,030	—
—	—	—	—	—	0,018	0,025	Nb=1,20÷1,50 Cr/Ni≥2,05
2,0—3,0	—	—	—	—	0,018	0,025	—
2,50—7,00	—	—	—	—	0,018	0,025	N <sub>2</sub> =0,1÷0,2

Марка стали		Содержание				
		C	Mn	Si	Cr	Ni
Высоколегированная	Св-06Х19Н10М3Т	≤0,08	1,00— 2,00	0,30— 0,80	18,0— 20,0	9,0— 11,0
	Св-30Х15Н35В3Б3Т	0,26— 0,32	0,50— 1,00	≤0,20	14,0— 16,0	34,0— 36,0
	Св-08Х19Н12М3	0,06— 0,10	1,0—1,7	0,30— 0,70	18,5— 20,5	11,5— 13,0
	Св-10Х20Н15	≤0,12	1,0—2,0	≤0,80	19,0— 22,0	14,0— 16,0
	Св-07Х25Н13	≤0,09	1,0—2,0	0,50— 1,00	23,0— 26,0	12,0— 14,0
	Св-13Х25Н18	≤0,15	1,0—2,0	≤0,50	24,0— 27,0	17,0— 20,0
	Св-08Х20Н10Г6	≤0,10	5,0—7,0	0,20— 0,70	20,0— 22,0	9,0— 11,0
	Св-08Х20Н9Г7Т	≤0,10	6,0—8,0	0,50— 1,00	18,0— 22,0	8,0— 10,0
	Св-25Х25Н16Г7	0,20— 0,28	6,0—8,0	≤0,30	24,0— 27,0	15,0— 17,0
	Св-08Х25Н5ТМФ	≤0,10	0,80	≤1,0	24,0— 26,5	4,80— 5,70
	Св-08Н50	≤0,10	0,50	≤0,50	≤0,30	48,0— 53,0

#### СОСТАВЫ ПРОВОЛОК ДЛЯ СВАРКИ АЛЮМИНИЯ

Марка проволоки	Химический				
	Основные				
	Al	Mg	Mn	Fe	Si
Св-А97	≥99,97	—	—	—	—
Св-А5С		—	—	0,2—0,35	0,1—0,25
Св-АМц	≥99,5	—	1—1,5	0,3—0,5	0,2—0,4
Св-АМг3		3,2—3,8	0,3—0,6	—	0,5—0,8
Св-АМг5		4,8—5,8	0,5—0,8	—	—
Св-АМг6	Осталь- ное	5,8—6,8	0,5—0,8	—	—
Св-АМг7		6,5—7,5	0,5—0,8	—	—
Св-АК3		0,5—0,9	0,2—0,6	—	2,75—3,25
Св-АК5	—	—	—	—	4,5—6,0
Св-АК10	—	—	—	—	7,0—10,0
Св-АК12	—	—	—	—	11,5—13,5

Примечания:

1. Для проволок марок Св-А5С и Св-АМц соотношение содержания Fe
2. Для проволок марок Св-АМг3, Св-АК5, Св-АК10 и Св-АК12 допускается
3. Содержание Ве устанавливается по расчету шихты.
4. Проволока марок Св-АМг7 и Св-АК10 поставляется в горячепрессованном



элементов, %

Mo	W	Ti	V	S	P	Прочие элементы
				не более		
2,0—3,0	—	0,50—0,80	—	0,018	0,030	—
—	2,50—3,00	0,60—1,00	—	0,015	0,025	Nb=2,80÷3,30
2,3—2,8	—	—	—	0,018	0,025	—
—	—	—	—	0,018	0,025	—
—	—	—	—	0,018	0,025	—
—	—	—	—	0,018	0,025	—
—	—	—	—	0,018	0,035	—
—	—	0,60—0,90	—	0,018	0,035	—
—	—	—	—	0,018	0,030	—
0,06—0,12	—	0,08—0,20	0,08—0,15	0,018	0,030	N <sub>2</sub> =0,1÷0,2
—	—	—	—	0,02	0,03	—

ПРИЛОЖЕНИЕ II

И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ (ГОСТ 7871—63)

состав в %

элементы			Примеси, не более						
Ti	Be	Zr	Fe	Si	Zn	Cu	Mg	Прочие примеси	Сумма примесей
—	—	—	0,015	0,015	—	0,005	—	0,01	0,03
—	—	—	—	—	—	0,015	—	0,05	0,5
—	—	—	—	—	0,1	0,2	0,05	0,1	1,35
—	—	—	0,5	—	0,2	0,05	—	0,1	0,85
0,1—0,2	0,002	—	0,4	0,4	0,2	0,05	—	0,1	1,4
—	0,005	—	—	—	—	—	—	—	—
0,1—0,2	0,002	—	0,4	0,4	0,2	0,1	—	0,1	1,2
—	0,005	—	—	—	—	—	—	—	—
—	0,002	0,2—0,4	0,4	0,4	0,2	0,1	—	0,1	1,3
—	0,005	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	0,3	—	0,1	0,05	—	0,1	0,5
—	—	—	0,6	—	Zn+Sn	0,2	—	0,1	1,0
—	—	—	—	—	0,1	—	—	—	—
—	—	—	0,6	—	0,2	0,1	0,1	0,1	1,1
—	—	0,05—0,25	0,3	—	—	0,2	—	0,1	0,6

и Si должно быть больше единицы.  
содержание остаточного Ti ≤ 0,15%.

состоянии, проволока марки Св-АК12 в прессованном.

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ  
 КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ (ГОСТ 9467—60)

Типы электродов	Механические свойства					Содержание в металле шва или в наплавленном металле в %		Основное назначение
	металла шва или наплавленного металла при применении электродов диаметром более 2,5 мм			сварного соединения при применении электродов диаметром 2,5 мм и менее		серы	фосфора	
	Временное сопротивление разрыву в кг/мм <sup>2</sup>	относительное удлинение δ <sub>5</sub> в %	Ударная вязкость в кг·ж/см <sup>2</sup>	Временное сопротивление разрыву в кг/мм <sup>2</sup>	Угол загиба в град			
не менее					не более			
Э-34	34	—	—	34	30	0,05	0,05	Для сварки малоуглеродистых и низколегированных сталей
Э-42	42	18	8	42	120	0,05	0,05	
Э-42А	42	22	14	42	180	0,04	0,04	
Э-46	46	18	8	46	120	0,05	0,05	
Э-46А	46	22	14	46	150	0,04	0,04	
Э-50	50	16	6	50	90	0,05	0,05	Для сварки среднеуглеродистых и низколегированных сталей
Э-50А	50	20	13	50	150	0,04	0,04	
Э-55	55	20	12	55	140	0,04	0,04	
Э-60	60	16	6	—	—	0,04	0,04	
Э-60А	60	18	10	—	—	0,04	0,04	
Э-70	70	12	6	—	—	0,04	0,04	Для сварки легированных сталей повышенной прочности
Э-85	85	12	5	—	—	0,04	0,04	
Э-100	100	10	5	—	—	0,04	0,04	
Э-125	125	6	4	—	—	0,04	0,04	
Э-145	145	5	4	—	—	0,04	0,04	

Примечание.  
 Механические свойства электродов Э-85, Э-100, Э-125, Э-145 даны после термической обработки, согласно паспортам на электроды.

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ  
ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ (ГОСТ 9467—60)

Типы электродов	Механические свойства при 20° С			Химический состав в %		
	Временное сопротивление разрыву в кг/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение δ <sub>5</sub> в %	Ударная вязкость в кг·м/см <sup>2</sup>	С	Si	Mn
Э-М	50	18	8	0,06—0,12	≤0,35	0,4—0,8
Э-МХ	50	18	8	0,06—0,12	≤0,35	0,4—0,8
Э-ХМ	50	16	8	0,06—0,12	0,15—0,45	0,5—0,9
Э-ХМФ	50	16	8	0,08—0,13	0,15—0,45	0,5—0,9
Э-ХМФБ	55	14	6	0,08—0,13	0,15—0,45	0,5—0,9
Э-Х2МФБ	55	14	6	0,08—0,13	0,15—0,45	0,5—0,9
Э-Х5МФ	55	14	6	0,08—0,13	0,15—0,45	0,5—0,9

Типы электродов	Химический состав в %					
	Cr	Mo	V	Ni	S	P
					не более	
Э-М	—	0,40—0,70	—	—	0,05	0,05
Э-МХ	0,3—0,6	0,40—0,70	—	—	0,04	0,04
Э-ХМ	0,7—1,0	0,40—0,70	—	—	0,04	0,04
Э-ХМФ	0,8—1,2	0,40—0,70	0,10—0,35	—	0,04	0,04
Э-ХМФБ	1,0—1,4	0,70—1,00	0,15—0,40	0,10—0,25	0,04	0,04
Э-Х2МФБ	2,4—3,0	0,70—1,00	0,25—0,50	0,35—0,65	0,04	0,04
Э-Х5МФ	4,5—5,0	0,40—0,70	0,10—0,35	—	0,04	0,04

Примечание.  
Здесь приведены механические свойства после термической обработки соответственно паспорту на электроды.

ТРЕБОВАНИЯ ГОСТ 10052-62 К НАПЛАВЛЕННОМУ МЕТАЛЛУ ПРИ СВАРКЕ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ  
С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ ЭЛЕКТРОДАМИ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ

ПРИЛОЖЕНИЕ V

Тип электрода	Содержание элементов в %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb			
ЭА-1	До 0,08	До 1,20	До 2,0	18,5—22,5	7,0—9,8	—	—			
ЭА-1а	» 0,10	» 1,20	» 2,0	18,5—21,5	7,5—9,8	—	—			
ЭА-1Б	» 0,12	» 1,30	» 2,50	19,0—23,0	8,0—10,4	—	—	0,70—1,30, но не ниже 8·С		
ЭА-1В2Б	» 0,12	0,15—0,55	1,50—2,20	17,5—21,5	8,0—10,4	—	—	0,65—1,0, но не ниже 8·С		
ЭА-1Г6	» 0,13	До 1,50	5,00—7,00	17,0—21,0	8,0—11,0	—	—			
ЭА-1М2Ф	» 0,13	» 1,0	До 3,0	16,5—22,5	7,5—12,5	1,80—3,30	—			
ЭА-1М2	» 0,09	» 0,60	» 3,0	16,5—19,5	9,0—12,0	2,0—3,10	—			
ЭА-2	» 0,12	» 1,0	» 2,50	23,0—27,0	11,5—14,0	—	—			
ЭА-2Г6	0,15—0,25	» 0,50	5,00—7,00	22,0—26,0	15,0—19,0	—	—			
ЭА-3М6	0,08—0,15	0,15—0,50	1,00—2,20	14,0—17,0	23,5—27,3	5,00—7,00	—			
ЭА-4В3Б2	0,25—0,32	До 0,50	1,50—2,50	14,0—16,0	34,0—36,0	—	—	1,9—2,5		
ЭФ-ХПВМНФ	0,09—0,15	0,30—0,80	0,50—1,10	9,5—11,5	0,6—0,9	0,6—0,9	—			
ЭФ-Х13	0,08—0,16	0,40—1,0	0,50—1,50	11,0—14,5	До 0,6	—	—			
ЭФ-Х17	До 0,14	До 1,0	До 1,5	15,0—18,0	» 2,0	—	—			

Тип электрода	Содержание элементов в %			Возможное дополнительное легирование	Содержание ферритной фазы в %	Стоимость противостальной коррозий	Механические свойства при 20° С				
	P	S	Прочие элементы				$\sigma_b$ в кг/мм <sup>2</sup>	$\delta$ в %	$a_n$ в кг·ж/см <sup>2</sup>	не менее	
										30	10
ЭА-1	0,030	0,020	—	—	6,0—15,0	*	55	30	10		
ЭА-1а	0,030	0,020	—	—	2,5—7,0	**	53	30	12		
ЭА-1Б	0,030	0,020	—	—	5,5—15,0	*	63	22	6		
ЭА-1В2Б	0,030	0,020	W1,30—1,80	—	5,5—13,0	*	63	22	6		
ЭА-1Г6	0,040	0,020	—	Mo 0,30—0,80	**	**	55	25	9		
ЭА-1М2Ф	0,035	0,020	V0,30—0,75	—	5,5—10,0	*	60	28	8		
ЭА-1М2	0,035	0,020	—	V0,30—0,75	5,0—12,0	*	55	25	8		
ЭА-2	0,030	0,020	—	—	2,5	**	55	25	9		
ЭА-2Г6	0,030	0,020	—	—	**	**	55	30	12		
ЭА-3М6	0,030	0,020	—	—	**	**	60	30	10		
ЭА-4В3Б2	0,025	0,015	W2,40—3,40	Co 4,00—5,00	**	**	62	18	6		
ЭФ-ХПВМНФ	0,035	0,030	W0,80—1,30	—	**	**	80	14	5		
ЭФ-Х13	0,040	0,025	—	—	**	**	60	16	5		
ЭФ-Х17	0,040	0,025	—	—	**	**	65	**	**		

Примечание.

Одна звездочка означает, что стоимость против межкристаллитной коррозии испытывается по методу АМ ГОСТ 6032—58 без провоцирующего отпуска; две звездочки — не нормируется.

ТРЕБОВАНИЯ ГОСТ 10051-62 К НЕКОТОРЫМ ТИПАМ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ  
ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ

Типы электродов	Содержание элементов в %							Твердость HRC в рабочем состоянии	Примерные марки электродов
	C	Mn	Si	Cr	Mo	W	Прочие элементы		
ЭН-70Х11 — 25 *	0,50— 0,80	—	—	10,0— 12,0	—	—	—	25—35	ОМГ
ЭН-70Х11Н3 — 25 *	0,50— 0,80	—	—	10,0— 12,0	—	—	Ni 2,5—3,5	25—33	ОМГ-Н
ЭН-18Г4 — 35 *	0,16— 0,20	3,5— 4,2	—	—	—	—	—	35—40	ОЗН-350
ЭН-25Х12 — 40	0,15— 0,30	0,3— 1,0	—	10,0— 14,0	—	—	—	40	ЦН-5
ЭН-У12Х12Г2ФС — 55	1,00— 1,40	1,6— 2,4	1,0— 1,7	10,5— 13,5	—	—	V 1,0—1,5	54 (т)	Ш-1
ЭН-30Х3В8 — 40	0,20— 0,40	—	—	2,0—3,5	—	7,0—9,0	—	40	ЦШ-1
ЭН-60Х2СМ — 50 *	0,50— 0,90	—	0,5— 1,2	2,3—3,2	0,3— 0,7	—	—	52—60	ЭН-60М
ЭН-35Г6 — 50	0,25— 0,45	5,5— 6,5	—	—	—	—	—	50	ЦН-4

Типы электродов	Содержание элементов в %							Твердость HRC в рабочем состоянии	Примерные марки электродов
	C	Mn	Si	Cr	Mo	W	Прочие элементы		
ЭН-80В18Х4Ф — 60	0,70— 0,85	—	—	3,8—4,5	—	17,0— 19,5	V 1,0—1,4	57—62 (т) **	ЭНР-62, ЦИ-1М
ЭН-90В9Х4Ф2 — 60	0,85— 1,00	—	—	4,0—5,0	—	8,5— 10,5	V 2,0—2,6	48—52 (т) **	ЦИ-2У
ЭН-У30Х28С4Н4 — 50 *	2,50— 3,40	—	2,8— 4,2	25,0— 31,0	—	—	Ni 3,0—5,0	48—54	ЦС-1
ЭН-У30Х23Р2С2ТГ — 55 *	3,0— 3,50	1,0— 1,5	2,0— 2,5	22,0— 24,0	—	—	B 1,0—2,0, Ti 1,0—1,5	55—62	Т-620
ЭН-У18К62Х3В5С2 — 40	1,6—2,3	—	1,5— 2,0	26,0— 32,0	—	4,0—5,0	Co 59,0—65,0	40	ЦН-2
ЭН-У20Х30Н6Г2 — 40	1,6—2,3	1,5— 3,0	—	26,0— 32,0	—	—	Ni 5,0—8,0	40	ЦН-3
ЭН-08Х20Н11С9Г2 — 45	0,15	1,0— 2,0	8,0— 9,0	19,0— 23,0	—	—	Ni 10,0—13,0	45	ЦН-8

\* Требования к химическому составу направленного металла факультативны.  
 \*\* (т) — твердость направленного металла после термообработки.

ПЛОТНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ,  
ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЭЛЕКТРОДНЫХ ПОКРЫТИЯХ

Наименование материала	Плотность в $г/см^3$	Примечание
Мрамор	2,70—2,9	—
Плавленый шпат	3,0—3,2	—
Полевой шпат	2,5—2,7	—
Двуокись титана	3,5	—
Кварцевый песок	2,65	—
Марганцевая руда	4,8—5,1	—
Ферромolibден	9,0	[Mo] = 60%
Хром металлический	7,15	[Cr] = 98%
Ферротитан	~6,0	[Ti] ≈ 25%
Феррованадий	7,0	[V] = 40%
Ферровольфрам	16,5	[W] ≈ 80%
Марганец металлический	7,3	
Ферромарганец	6,7—6,9	[Mn] = 82% $\gamma = 6,7 г/см^3$
Феррониобий	7,3	[Nb] = 40%
Ферросилиций Си-75	~3,3	[Si] ≈ 75%
Ферросилиций Си-45	~5,1	[Si] = 45%
Алюминий	2,7	—
Железо	7,8	—
Жидкое стекло (сухой остаток)	2,3—2,4	—

ХАРАКТЕРИСТИКА ЛАТУННОЙ СЕТКИ ДЛЯ ПРОСЕВА

№ сетки		Размер ячейки в мм	Диаметр прово- локи в мм	Средний вес 1 м <sup>2</sup> сетки в кг	Число ячеек на 1 см <sup>2</sup>	Число проволок на 1 пог. см
по ГОСТу 6613—53 или 3584—53	по преи- скуранту Глав- электро- сбыта					
2,5	—	2,5	0,50	1,18	11,2	3,3
2	10	2,0	0,50	1,41	16,0	4,0
1,6	12	1,6	0,45	1,39	23,8	4,9
1,25	15	1,25	0,40	1,33	34,6	5,9
1	18	1,0	0,35	1,23	54,9	7,4



№ сетки		Размер ячейки в мм	Диаметр проволоки в мм	Средний вес 1 м <sup>2</sup> сетки в кг	Число ячеек на 1 см <sup>2</sup>	Число проволок на 1 пог. см
по ГОСТу 6613—53 или 3584—53	по преискуранту Главэлектросбыта					
09	20	0,90	0,35	1,38	64,0	8
08	—	0,80	0,30	1,20	82,6	9,1
07	25	0,70	0,30	1,27	98,0	9,9
063	—	0,63	0,25	1,00	130,0	11,4
056	32	0,56	0,23	0,97	160,0	12,6
05	35	0,50	0,22	0,94	198	13,9
045	40	0,45	0,18	0,72	252	15,9
04	45	0,40	0,15	0,58	331	18,2
0355	50	0,355	0,16	0,63	400	20,0
0315	55	0,315	0,14	0,61	494	22,2
028	60	0,280	0,14	0,65	567	23,8
025	65	0,250	0,13	0,62	694	26,4
0224	70	0,224	0,13	0,66	763	27,8
02	75	0,200	0,13	0,72	918	30,3
018	80	0,180	0,13	0,76	1 040	32,3
0,16	90	0,160	0,12	0,72	1 480	38,5
—	100	0,154	0,10	0,54	1 600	39,4
014	—	0,140	0,09	0,56	1 890	43,5
0125	120	0,125	0,09	0,54	2 130	36,5
0112	130	0,112	0,08	0,46	2 630	31,5
01	150	0,100	0,07	0,40	3 460	58,8
009	160	0,090	0,07	0,43	3 900	62,5
008	190	0,080	0,055	0,30	5 476	74,0
0071	200	0,071	0,055	0,33	6 400	80,0
0063	230	0,063	0,045	0,25	8 270	91,0
0056	270	0,056	0,04	0,24	10 095	104,0
005	300	0,050	0,035	0,21	13 900	118,0
0045	325	0,045	0,035	0,22	15 000	125,0
004	350	0,040	0,030	0,21	20 450	143,0

## Примечание.

Сетки с номерами, выраженными в меш (число ячеек на 1 пог. дюйм), приблизительно соответствуют сеткам с такими же номерами по преискуранту Главэлектросбыта.

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ

1. Мрамор электродный (ГОСТ 4416—48) \*. Основной составляющей мрамора является кристаллический углекислый кальций. Мрамор должен удовлетворять следующим техническим требованиям:

Месторождение	Химический состав в %				Цвет	Размерность
	CaCO <sub>3</sub>	MgO	S	P		
Колгинское—Южный Урал; Прохор-Баладинское — Челябинская область; Белая Гора, Красногорское — Карельская АССР; Западно-Баллаклавское — Крым	≥92,0	≤3,0	≤0,04	≤0,015	Белый или светло-серый	Кусковой или крошка

\* С изменениями переиздания в 1963 г.

2. Шпат плавиковый электродный (ГОСТ 4421—48) \*. Основной составляющей плавикового шпата является CaF<sub>2</sub>. Плавиковый шпат должен удовлетворять следующим требованиям:

Месторождение	Химический состав в %				Цвет	Размерность
	CaF <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	S	P		
Абагайту— Забайкалье; Амдерма — Ненецкий автономный округ; Аурахмат — Казахская ССР	≥92,0	≤5,0	≤0,1	≤0,015	Прозрачный, фиолетово-сиреневый или желтый	Кусковой

\* С изменениями в 1955 г.

3. Песок кварцевый электродный (ГОСТ 4417—48) \*. Основной составляющей кварца является кремнекислота. Кварц должен отвечать следующим требованиям:

Месторождение	Химический состав в %				Цвет	Размерность
	SiO <sub>2</sub>	S	P	Прочие		
Люберецкое — Московская область; Саблинское — Ленинградская область; Часов Яр — УССР; Всесвятское — Урал	≥97,0	Следы	≤0,015	≤3,0	Белый или прозрачный	Кусковой, мелкие зерна

\* С изменениями переиздания в 1954 г.

4. Шпат полевої электродный (ГОСТ 4422—48). Представляет собой минерал, основу которого составляют калиевые и натровые алюмосиликаты ( $K_2O, Na_2O$ )  $\times$   $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ . Полевой шпат должен удовлетворять следующим требованиям:

Месторождение	Химический состав в %	Цвет	Размерность	Вид
Оленчик, Северная Варака — Карельская АССР; ст. Гута — УССР; Галанино — Урал	$SiO_2 = 64 \div 61$ $Al_2O_3 = 17 \div 21$ $K_2O + Na_2O \geq 10$ $Fe_2O_3 \leq 1,5$ $CaO \leq 1,5$ $MnO \leq 1,0$ $S \leq 0,04$ $P \leq 0,04$	Белый или розовый	Кусковой	Ортоклаз или микроклин

5. Руда марганцевая электродная (ГОСТ 4418—48). Основной составляющей добываемой марганцевой руды являются окислы марганца ( $MnO, MnO_2$ ). Руда применяется мытой. Основные требования к марганцевой руде следующие:

Месторождение	Химический состав в %				
	Mn	$SiO_2$	$Al_2O_3$	S	P
Чиатурское — Грузия; Никопольское — УССР	$\geq 45$	$\leq 10$	$\leq 3,0$	$\leq 0,1$	$\leq 0,2$

6. Гематит представляет собой минерал. Основой гематита является немагнитная окись железа ( $Fe_2O_3$ ) состава:  $Fe_2O_3 \geq 92\%$ ;  $SiO_2 \leq 6\%$ ;  $Al_2O_3 \leq 1,7\%$ ;  $S \leq 0,15\%$ ;  $P \leq 0,1\%$ .

7. Рутиловый концентрат (ВТУ ВНИИСТ). Выпускает Верхнеднепровский горно-металлургический комбинат и Скопинская обогатительная ф-ка (Рязанская обл.). Должен отвечать следующим требованиям:

Наименование	Химический состав в %						
	$TiO_2$	не более					
		$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$ZrO_2$	S	P
Рутиловый концентрат	$\geq 90,0$	3,0	2,5	3,0	2,0	0,05	0,05

8. Слюда — мусковит, представляющая собой алюмосиликат калия ( $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 2H_2O$ ). По ТУ Петрозаводской слюдяной фабрикой поставляется в виде порошка микосагинета или в виде чешуйки при следующем составе:  $SiO_2 = 40—45\%$ ;  $Al_2O_3 = 37—38,5\%$ ;  $K_2O = 11,0—12\%$ ;  $MgO = 0,5—1,0\%$ ;  $S \leq 0,04\%$ ;  $P \leq 0,03\%$ ;  $H_2O = 4,5\%$ .

9. Магнезит сырой, кристаллический. Поставляется по ТУ ЦНИИТмаш Саркиным месторождением Челябинской области. Должен отвечать по составу следующим требованиям:  $MgO \geq 45\%$ ;  $CaO \leq 0,5\%$ ;  $SiO_2 = 0,5—1,5\%$ ;  $Al_2O_3 = 0,5—1,5\%$ ;  $Fe_2O_3 = 0,7—1,5\%$ ;  $S \leq 0,08\%$ ;  $P \leq 0,05\%$ .

10. Целлюлоза электродная ЭЦ (ТУ ЦНИИТмаш 417—54). Поставляется Камским целлюлозно-бумажным комбинатом.

11. Ферросилиций (ГОСТ 1415—61). Выплавляется в электропечах. Применяется в электродном производстве марок Си-75 и Си-45, отвечающих требованиям состава по таблице:

Марка	Химический состав в %				
	Si	Mn	Cr	S	P
Си-75	74—80	≤0,7	≤0,5	≤0,03	≤0,05
Си-45	40—47	≤0,8	≤0,5	≤0,03	≤0,05

12. Ферромарганец (ГОСТ 4755—49 \*). Наиболее распространено в электродном производстве использование ферромарганца марок Мн-1, Мн-0, отвечающих следующим требованиям по составу:

Группа ферромарганца	Обозначение марки	Химический состав в %				
		Mn	C	Si	S	P
Малоуглеродистый	Мн-0	≥80,0	≤0,5	≤2,0	≤0,03	≤0,30
Среднеуглеродистый	Мн-1	≥80,0	≤1,0	≤2,0	≤0,03	≤0,30

\* По переизданию 1965 г.

13. Марганец металлический (ГОСТ 6008—51). В электродных покрытиях может использоваться металлический марганец, отвечающий требованиям, приведенным в таблице:

Марка	Химический состав в %					Всего примесей
	Mn	C	Si	S	P	
Мр0	≥99,7	≤0,10	—	≤0,10	≤0,01	≤0,3
Мр1	≥95,0	≤0,10	≤0,8	≤0,10	≤0,05	≤5,0
Мр2	≥93,0	≤0,20	≤1,8	≤0,10	≤0,07	≤7,0

14. Ферротитан (ГОСТ 4761—67). Применяемый в электродном производстве ферротитан должен удовлетворять по составу следующим требованиям:

Марка	Химический состав в %										
	Ti	не более									
		C	S	P	Cu	Mo	Zr	V	Sn	Отношение Al/Ti	Отношение Si/Ti
Ти-0	28,0—35,0	0,10	0,03	0,04	0,05	0,05	0,1	0,2	0,01	0,25	0,12
Ти-1	25,0—35,0	0,15	0,04	0,04	2,0	0,4	0,3	0,4	0,04	0,25	0,16
Ти-2	25,0—35,0	0,20	0,07	0,07	3,5	1,0	0,7	1,0	0,08	0,40	0,28

15. Феррохром (ГОСТ 4757—67). Наибольшее применение в электродном производстве имеют марки феррохрома ФХ100 и ФХ200, отвечающие по составу следующим требованиям:

Группа феррохрома	Марка	Химический состав в %						
		Cr	не более				По классам	
			C	Si	S	A	B	
Среднеуглеродистый	ФХ100	$\geq 65,0$	1,0	2,0	0,04	0,04	0,08	
	ФХ200	$\geq 65,0$	2,0	2,0	0,04	0,04	0,08	

16. Хром металлический (ГОСТ 5965—67). Требования к маркам хрома металлического приведены в таблице:

Марка	Химический состав в %							
	Cr	не более						
		Al	Si	Fe	Cu	C	S	P
X1	$\geq 98,0$	0,7	0,5	0,8	0,04	0,04	0,03	0,03
X2	$\geq 97,0$	1,5	0,5	1,2	0,05	0,05	0,04	0,03
X3	$\geq 97,0$	0,1	1,0	1,2	0,01	0,06	0,03	0,03

17. Ферромolibден (ГОСТ 4759—69). В таблице приводятся требования к составу ферромolibдена:

Марка	Химический состав в %									
	Mo	не более								
		W	Si	C	S	P	Cu	As	Sb	Sn
ФМ1	$\geq 58,0$	0,6	0,8	0,05	0,10	0,05	0,5	0,03	0,02	0,015
ФМ2	$\geq 55,0$	1,0	1,5	0,10	0,15	0,10	1,5	0,05	0,05	0,050
ФМ3	$\geq 55,0$	1,0	2,0	0,20	0,20	0,20	2,5	0,10	0,10	0,100

18. Феррованадий (ГОСТ 4760—49 \*). Обычно применяется в электродном производстве марки Вд-3, следующего состава:

Марка	Химический состав в %							
	V	не более						
		C	Si	S	P	Al	As	
Вд-3	$\geq 35,0$	1,0	3,5	0,15	0,25	2,0	0,05	

\* С изменениями по изданию 1958 г.

19. Алюминиевый порошок (ГОСТ 4135—48); по внешнему виду должен быть сероватый, с металлическим оттенком. Применяемый порошок марки ПАП-1 должен отвечать требованиям:

Марка	Химический состав в %				Влага (не более) в %
	Al	не более			
		Fe	Si	Cu + Zn	
ПАП-1	≥95,0	1,2	1,5	0,6	0,2

20. Порошок железный (ГОСТ 9849—61). Из многих марок порошка железного для сварочного производства в основном применяются марки ПЖ1с, ПЖ2с, ПЖ1м, ПЖ2м грануляции. Технические требования сведены в таблицу:

Марка	Группа по гранулометрическому составу	Химический состав в %							Гранулометрический состав (в % остатка на сите)	Насыпной вес в г/см <sup>3</sup>
		Fe	не более							
			C	Si	Mn	S	P	O		
ПЖ1с	Средний	≥98,5	0,08	0,20	0,5	0,02	0,02	0,5	016—≤10% 025—≤70%	По требованию потребителя
ПЖ2с		≥98,0	0,12	0,25	0,5	0,03	0,03	0,5		
ПЖ1м	Мелкий	≥98,5	0,02	0,20	0,5	0,02	0,02	1,0	Мелкий — роса 016—≤20% 0071—≥35%	
ПЖ2м		≥98,0	0,03	0,25	0,5	0,03	0,03	1,0		

21. Графит — чешуйчатая или крупнокристаллическая разновидность самородного углерода — порошок серо-стального цвета. Должен удовлетворять требованиям ОСТ 10555—40 и иметь следующий состав (в % вес.):

Графит	Марка	C в %	CaO+ MgO	S	Зола	Летучие	Влага
По ОСТ 10555—40	—	≥90,0	—	0,2	9,0	1,0	1,0
Завальский	ЗТ	—	3,0	0,2	9,5	3,5	0,5
Ботогольский	БТ	—	3,0	0,2	6,0	2,0	0,5

22. Стекло натриевое жидкое (ГОСТ 13078—67). Для изготовления электродов и керамических флюсов применяется содовое стекло, удовлетворяющее следующим требованиям:

Показатели	Нормы
Внешний вид	Густая жидкость желтого или серого цвета, без включений, видимых невооруженным глазом
Содержание кремнезема в %	31—33
» окиси натрия в %	10—12
» Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> и Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в %	0,25
» CaO в %	0,20
» SO <sub>3</sub> (в пересчете на S) в %	0,06
Силикатный модуль	2,65—3,40
Плотность в г/см <sup>3</sup>	1,36—1,50

## Литература

1. Автоматическая электродуговая сварка. Под ред. Е. О. Патона. Москва—Киев, Машгиз, 1953 г.
2. Автоматическая сварка под флюсом. Под ред. Е. О. Патона. Москва—Киев, Машгиз, 1948.
3. А л о в А. А. Основы теории металлургии дуговой сварки малоуглеродистых сталей. — Вопросы теории сварочных процессов. М., Машгиз, 1948 (ЦНИИТМАШ, кн. 14).
4. Б а г р я н с к и й К. В., Л а в р и к П. Ф. О механизме легирования капель металла при сварке под флюсом. — «Сварочное производство», 1963, № 10.
5. Б л а г о в е щ е н с к а я В. В., Г о л о л о б о в Б. А., С т р о г о в а В. Я. Технология изготовления электродов для дуговой сварки. Л., изд-во «Машиностроение», 1966.
6. Б о р о в у ш к и н И. В., П е т р о в Г. Л. Распределение водорода в околошовной зоне при сварке высокопрочных сталей. — Сварочное производство. М.—Л., изд-во «Машиностроение», 1966 (Труды ЛПИ, № 262).
7. Б о р о в у ш к и н И. В., П е т р о в Г. Л. Влияние водорода на образование околошовных трещин при сварке закаляющихся сталей. — «Сварочное производство», 1966, № 11.
8. Б р у к Б. И. Радиоактивные изотопы в металлургии и металловедении сварки. Л. Судпромгиз, 1959.
9. Газопламенная обработка металлов. Учебное пособие для курсов инструкторов. М., Профтехиздат, 1962.
10. Г л и з м а н е н к о Д. Л. Получение кислорода. М., изд-во «Химия», 1965.
11. Г л и з м а н е н к о Д. Л., Е в с е е в Г. Б. Газовая сварка и резка металлов. М., Машгиз, 1961.
12. Г л у ш к о в а Л. И. Некоторые вопросы низкотемпературной пайки припоями на базе галлия. — Обработка металлов давлением и сварка. Л., изд-во «Машиностроение», 1968 (Труды ЛПИ, № 299).
13. Г р е в ц е в Н. В. Аргонодуговая и электроннолучевая сварка тантала и ниобия. — «Сварочное производство», 1962, № 2.
14. Г р ж и м а л ь с к и й Л. Л., К о р о м ы с л о в а Г. И. Соединение металлов галлиевыми припоями. — «Машиностроитель», 1967, № 12.
15. Г р и г о р е н к о Г. М., Л а к о м с к и й В. И. О поглощении водорода и азота металлом при электродуговой сварке. — «Автоматическая сварка», 1964, № 11.
16. Г у р е в и ч С. М., Д и д к о в с к и й В. П. Некоторые вопросы электрошлаковой сварки титана. — «Автоматическая сварка», 1967, № 3.
17. Д а в ы д е н к о И. Д. Справочник по сварочным электродам. Ростовское кн. изд-во, 1961.
18. Д е м ь я н ц е в и ч В. П. Металлургические и технологические основы сварки. М.—Л., Машгиз, 1962.
19. Д у б о в а Т. Н. Регулирование содержания кремния и марганца в наплавленном металле. — Сварочное производство. М.—Л., Машгиз, 1949 (Труды ЛПИ, № 3).

20. Дубова Т. Н. Регулирование содержания хрома и молибдена в наплавленном металле. — Сварочное производство. М.—Л., Машгиз, 1951 (Труды ЛПИ, № 3).

21. Дятлов В. И. Особенности металлургических процессов при сварке под флюсом. Юбилейный сб., посвященный Е. О. Патону. АН УССР, 1951.

22. Ерохин А. А. Кинетика металлургических процессов дуговой сварки. М., изд-во «Машиностроение», 1964.

23. Ерохин А. А. Об окислительном действии некоторых компонентов электродных покрытий при дуговой сварке. — «Сварочное производство», 1957, № 12.

24. Ерохин А. А., Рахманов А. Д. Металлические электроды для ручной дуговой сварки и наплавки. Справочник по сварке. Под ред. Е. В. Соколова. Т. 2. М., ГНТИ машиностроительной литературы, 1961.

25. Ершов Г. С., Курочкин К. Т., Умрихин П. В. К вопросу о кинетике перехода водорода из газовой фазы через шлак в металл. — Изв. вузов, Черная металлургия, 1961, № 6.

26. Ефимов Л. А. К расчету шихты электродных покрытий, — Сварочное производство. М.—Л., Машгиз, 1961 (Труды ЛПИ, № 216).

27. Закс И. А. Способ контроля замесов (шихты) покрытий, наносимых на электроды методом окунания. ОТИ ВПТИ, № 146, М., 1946.

28. Закс И. А. Оптимальные режимы пассивирования ферросплавов прокаткой и контроль качества пассивирования. ИТЭИ, № 1256/27. М., 1954.

29. Земзин В. Н. Сварные соединения разнородных сталей. М.—Л., изд-во «Машиностроение», 1966.

30. Иваненко В. Н., Будник Н. М. К вопросу о количестве газов, выделяющихся при сварке из электродной проволоки. — «Сварочное производство», 1964, № 9.

31. Игнатов В. А., Петров Г. Л. Авторадиографическое исследование распределения нитрида в сварных соединениях хромоникелевых аустенитных сталей. — Сварочное производство. Л., изд-во «Машиностроение», 1964 (Труды ЛПИ, № 245).

32. Игнатов В. А., Земзин В. Н., Петров Г. Л. Влияние никеля в аустенитных швах на миграцию углерода в сварных соединениях разнородных сталей. — «Автоматическая сварка», 1967, № 8.

33. Кирд И. В. Измерение температуры мощной сварочной дуги, горящей под флюсом. Юбилейный сб., посвященный Е. О. Патону. АН УССР, 1951.

34. Козлов Р. А. Водород при сварке корпусных сталей. Л., изд-во «Судостроение», 1969.

35. Крюковский Н. Н. Производство электродов для дуговой сварки. М., Машгиз, 1956.

36. Лашко Н. Ф., Лашко-Авакян С. В. Металловедение сварки. М., Машгиз, 1954.

37. Лашко Н. Ф., Лашко-Авакян С. В. Пайка металлов. М., Машгиз, 1959.

✓ 38. Любавский К. В. Металлургия сварки стали плавлением. Справочник по сварке. Под ред. Е. В. Соколова. Т. 1. М., Машгиз, 1960.

39. Ляпичев И. С. Выравнивающее свойство сварочной ванны. — Изв. Томского политехн. ин-та. Т. 85. 1957.

40. Макара А. М., Мосендз Н. А. Природа влияния металла шва на образование трещин в околшовной зоне. — «Автоматическая сварка», 1961, № 9.

41. Мовчан Б. А. Микроскопическая неоднородность в литых сплавах. Киев, ГИТЛ УССР, 1962.

42. Морозов А. Н. Водород и азот в стали. М.—Л., Металлургиздат, 1950.

43. Никифоров Г. Д., Силантьева С. Н. О мерах борьбы с пористостью при сварке сплава АМг6. — «Сварочное производство», 1963, № 1.

44. Новожилов Н. М., Суслов В. И. Сварка плавящимся электродом в углекислом газе. М., Машгиз, 1958.



45. Патон Б. Е., Слущкая Т. М. Дуговая сварка голой легированной проволокой без защитной среды. — «Автоматическая сварка», 1962, № 6.
46. Перцовский Г. А. Определение температуры ванны при электрошлаковом процессе калориметрическим методом. — Сб. «Сварка», № 2. Л., Судпромгиз, 1959.
47. Петров А. В., Новожилов Н. М. Дуговая сварка в защитных газах. Справочник по сварке. Под ред. Е. В. Соколова. Т. 2. М., Машгиз, 1961.
48. Петров Г. Л. Неоднородность металла сварных соединений. Л., Судпромгиз, 1963.
49. Петров Г. Л. Взаимодействие металла и шлака в процессе электрической дуговой сварки. — Сварочное производство. М.—Л., Машгиз, 1949 (Труды ЛПИ, № 3).
50. Петров Г. Л. Схема взаимодействия материалов при дуговой сварке под флюсом. — Сварочное производство. Л., изд-во «Машиностроение», 1967 (Труды ЛПИ, № 283).
51. Петров Г. Л. Влияние водорода на свойства сварных соединений низколегированных сталей. — Обработка металлов давлением и сварка. Л., изд-во «Машиностроение», 1969 (Труды ЛПИ, № 308).
52. Петров Г. Л., Смолкин И. Ш. О связи между допусками на толщину и относительный вес электродных покрытий. — «Сварочное производство», 1960, № 9.
53. Петров Г. Л., Щипков М. Д. Источники насыщения металла сварных швов газами при сварке титановых сплавов. — Сварочное производство. М.—Л., Машгиз, 1963 (Труды ЛПИ, № 229).
54. Петров Г. Л., Земзин В. Н., Гонсеровский Ф. Г. Сварка жаропрочных нержавеющей сталей. М.—Л., Машгиз, 1963.
55. Петров Г. Л., Калетина Т. В., Петрыкин В. И. и др. О влиянии влажности воздуха при сварке на содержание водорода в металле, наплавленном электродами с карбонатно-флюоритовым покрытием. — «Сварочное производство», 1968, № 8.
56. Подгаецкий В. В. Сварочные шлаки. Киев, изд-во «Наукова думка», 1964.
57. Походня И. К. Горячие (кристаллизационные) трещины при наплавке высокоуглеродистых высокохромистых сталей. — Горячие трещины в сварных соединениях, слитках и отливках. АН СССР, 1959.
58. Походня И. К., Суптель А. М. Механизированная сварка открытой дугой порошковой проволокой. — «Автоматическая сварка», 1969, № 11.
59. Походня И. К., Горпенюк В. Н. Влияние режима сварки на температуру капель электродного металла. — «Автоматическая сварка», 1969, № 8.
60. Походня И. К., Явдошин И. Р., Корицкий Г. Г. Взаимодействие металла с водородом при сварке электродами с рутиловым покрытием. — «Автоматическая сварка», 1969, № 1.
61. Рабкин Д. М. Распределение температур в ванне при автоматической сварке алюминия. — «Автоматическая сварка», 1956, № 2.
62. Сбарская Н. П., Тарпинский В. Л., Мазель А. Г. Металлургические процессы при нагреве и расплавлении покрытий газозащитных электродов. — «Сварочное производство», 1969, № 9.
63. Спасская А. Г., Смирнов Г. Л. Разработка и исследование контактного алюминиево-галлиевого сплава. — Бюлл. цветной металлургии, № 19, М., 1967.
64. Стрижевский И. И., Гузов С. Г., Ковальский В. А. Ацетиленовые станции. М., Машгиз, 1959.
65. Тихомирова О. И., Пикуннов Н. В. и др. Пайка меди медногаллиевыми припоями. — «Сварочное производство», 1967, № 10.
66. Третьяков Ф. Е. Опыт производственной сварки титана. — «Сварочное производство», 1956, № 10.
67. Фролов В. В. Поведение водорода при сварке. М., изд-во «Машиностроение», 1966.
68. Фрумин Н. И. Автоматическая электродуговая наплавка. Харьков, ГНТИ черной и цветной металлургии, 1961.

69. Хренов К. К., Кушнерев Д. М. Керамические флюсы для автоматической сварки и наплавки. Киев, ГИТЛ УССР, 1961.
70. Шамовский Э. Х., Прохоров А. А. Качество металла, наплавленного дуговой сваркой в вакууме. — «Автогенное дело», 1936, № 10.
71. Шашков А. Н. Производство качественных электродов для дуговой сварки, Москва—Свердловск, Машгиз, 1943.
72. Шашков А. Н. Основы регулирования состава газосварочного пламени. — «Автогенное дело», 1946, № 7.
73. Щипков М. Д. Зависимость содержания кислорода в металле шва от состава флюса при автоматической сварке малоуглеродистой стали. — Научные доклады высшей школы. «Металлургия», № 3. М., 1958.
74. Щипков М. Д. Поглощение азота из атмосферы камеры при сварке титана вольфрамовым электродом. — Обработка металлов давлением и сварка. Л., изд-во «Машиностроение», 1969 (Труды ЛПИ, № 308).
75. Щипков М. Д., Гончаров В. Я. Влияние примесей кислорода в атмосфере аргона на содержание кислорода в металле шва при сварке технического титана. — Обработка металлов давлением и сварка. Л., изд-во «Машиностроение», 1968 (Труды ЛПИ, № 299).
76. Электроды для дуговой сварки и наплавки. Каталог. Киев, изд-во «Наукова думка», 1967.
77. Электрошлаковая сварка. Под ред. Б. Е. Патона. Москва—Киев, Машгиз, 1959.
78. Яровинский Л. М., Баженов В. В. Электроды ЦНИИТмаш для сварки сталей и наплавки. М., Машгиз, 1954.
79. Christensen N. and Chipman I. Slag—Metal Interaction in Arc Welding, — Welding Research Council Bulletin Series, N 15. N. Y., January 1953.
80. Franz U. Vorgänge in der Kaverne beim YP—Schweissen Metallurgie der Schmelzschweißverfahren, — 4 Internationales Kolloquium, DDR, Magdeburg, 1964.
81. Jahn E. Schweissverbindungen zwischen ferritische und austenitischen stählen in versuch und Praxis. — Mitteilungen VGB, N 77, 1962.
82. Muir A. R. A revu of literature on the Causes of porosity in steel weld. — «Welding Journal», 1956, № 3.
83. Kobajachi T., Kichara T., Kikuchi I. Arc atmosphere and Nitrogen content of weld Metal. — «Welding in World», 1967, N 2.
84. Pothmann P. Zur Kenntniss der Schmelzflammen insbesondere der Acetylschweißflamme, — Schweissen und Schneiden und Metallspritzenmittels Acetylen Herausgegeben, v, Vogel Halle a/s, 1927.
85. Tucker I. K., Eberly F. Development of Ferritic—austenitic Weld Joint for steam Plant Applications. — «Welding Journal», 1956, N 11.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	3
<b>Глава I. Влияние сварочных материалов на свойства сварных соединений и наплавленных слоев . . . . .</b>	<b>10</b>
§ I.1. Строение сварных соединений . . . . .	—
§ I.2. Общая схема формирования химического состава металла сварных швов и наплавов при сварке плавлением . . . . .	16
§ I.3. Формирование химического состава металла вблизи границы сплавления . . . . .	23
§ I.4. Влияние соотношения механических свойств различных зон сварных соединений на их работоспособность в условиях механического нагружения . . . . .	28
§ I.5. Влияние соотношения составов основного металла и металла швов на некоторые особые служебные характеристики сварных соединений . . . . .	35
§ I.6. Связь свойств наплавленных слоев с выбором сварочных материалов . . . . .	42
<b>Глава II. Основные физико-химические процессы, происходящие при сварке. Участие в них сварочных материалов . . . . .</b>	<b>51</b>
§ II.1. Общая схема взаимодействия металлической, газовой и шлаковой фаз при сварке . . . . .	—
§ II.2. Степень завершенности реакций взаимодействия в условиях сварки . . . . .	63
§ II.3. Примеры взаимодействия металла с газообразным кислородом при различных способах сварки . . . . .	73
§ II.4. Взаимодействие металла с азотом, водородом и другими газами . . . . .	85
§ II.5. Взаимодействие металлической и шлаковой фаз при сварке . . . . .	95
§ II.6. Поведение металлических составляющих сварочных материалов при сварке. Раскисление. Легирование . . . . .	109
<b>Глава III. Металлические сварочные материалы . . . . .</b>	<b>121</b>
§ III.1. Сварочные электродные (присадочные, наплавочные) материалы для сварки плавлением . . . . .	—
§ III.2. Специальные электродные (присадочные, наплавочные) сварочные материалы . . . . .	126
§ III.3. Сварочные (штучные) плавящиеся электроды . . . . .	138
§ III.4. Применимость оценочных расчетов при разработке электродных покрытий . . . . .	156
§ III.5. Общие вопросы производства плавящихся электродов . . . . .	169
§ III.6. Основные характеристики технологического оборудования электродного производства . . . . .	179
§ III.7. Неплавящиеся электроды для дуговой сварки . . . . .	188
	279

§ III.8. Материалы электродов для машин электрической контактной сварки . . . . .	196
§ III.9. Припой для пайки . . . . .	200
<b>Глава IV. Неметаллические сварочные материалы . . . . .</b>	<b>208</b>
§ IV.1. Общие сведения о применении неметаллических сварочных материалов . . . . .	—
§ IV.2. Флюсы для дуговой автоматической, полуавтоматической и электрошлаковой сварки . . . . .	211
§ IV.3. Производство флюсов для дуговой автоматической, полуавтоматической и электрошлаковой сварки . . . . .	226
§ IV.4. Другие флюсы, применяемые в сварочном производстве	231
§ IV.5. Газы, применяемые при газопламенной обработке металлов	235
§ IV.6. Инертные защитные газы . . . . .	244
§ IV.7. Химически активные защитные газы . . . . .	250
Приложения . . . . .	256
Литература . . . . .	275