

В. В. ОВЧИННИКОВ, М. А. ГУРЕЕВА

СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Рекомендовано
Федеральным государственным учреждением
«Федеральный институт развития образования»
в качестве учебного пособия для использования
в учебном процессе образовательных учреждений,
реализующих программы среднего профессионального образования
по специальности «Сварочное производство»*

*Регистрационный номер рецензии 436
от 28 ноября 2010 г. ФГУ «ФИРО»*

2-е издание, стереотипное



Москва
Издательский центр «Академия»
2016

УДК 621.791(075.32)
ББК 30.4я723
О-355

Рецензент —

преподаватель спецдисциплин по специальности «Сварочное производство»
ГОУ СПО «Строительный колледж № 41» г. Москвы *Н. О. Петрусёва*

Овчинников В. В.

О-355 Современные материалы для сварных конструкций : учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / В. В. Овчинников, М. А. Гуреева. — 2-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2016. — 304 с.
ISBN 978-5-4468-2558-5

Рассмотрены общие вопросы выбора материалов для изготовления сварных конструкций. Приведены сведения по химическим составам и свойствам сталей, алюминиевых и титановых сплавов, используемых в сварных конструкциях. Описаны материалы с особыми свойствами — порошковые материалы, гранулированные сплавы и пористые материалы. Отражено влияние применения сварочных материалов на свойства сварных соединений. Даны типовые решения по применению металлических и неметаллических сварочных материалов.

Учебное пособие может быть использовано при освоении профессионального модуля ПМ.01 «Подготовка и осуществление технологических процессов изготовления сварных конструкций» по специальности «Сварочное производство».

Для студентов учреждений среднего профессионального образования. Может быть полезно специалистам, занимающимся производством сварных конструкций.

УДК 621.791(075.32)
ББК 30.4я723

Оригинал-макет данного издания является собственностью Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом без согласия правообладателя запрещается

© Овчинников В. В., Гуреева М. А., 2013
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2013
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2013

ISBN 978-5-4468-2558-5

Уважаемый читатель!

Данное учебное пособие является частью учебно-методического комплекта по специальности «Сварочное производство».

Учебное пособие предназначено для изучения профессионального модуля ПМ.01 «Подготовка и осуществление технологических процессов изготовления сварных конструкций».

Учебно-методические комплекты нового поколения включают в себя традиционные и инновационные учебные материалы, позволяющие обеспечить изучение общеобразовательных и общепрофессиональных дисциплин и профессиональных модулей. Каждый комплект содержит учебники и учебные пособия, средства обучения и контроля, необходимые для освоения общих и профессиональных компетенций, в том числе и с учетом требований работодателя.

Учебные издания дополняются электронными образовательными ресурсами. Электронные ресурсы содержат теоретические и практические модули с интерактивными упражнениями и тренажерами, мультимедийные объекты, ссылки на дополнительные материалы и ресурсы в Интернете. В них включен терминологический словарь и электронный журнал, в котором фиксируются основные параметры учебного процесса: время работы, результат выполнения контрольных и практических заданий. Электронные ресурсы легко встраиваются в учебный процесс и могут быть адаптированы к различным учебным программам.

Учебно-методический комплект разработан на основании Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования с учетом его профиля.

Сварка является одним из ведущих технологических процессов получения металлических конструкций. Для изготовления сварных конструкций, выполнения наплавочных работ применяется большое количество сварочных материалов.

Сварочные материалы классифицируют следующим образом:

- материалы, служащие в качестве основного металла для изготовления сварных конструкций;
- материалы, непосредственно участвующие в образовании сварного соединения, в частности металла шва. К ним относятся штучные плавящиеся электроды для ручной дуговой сварки, электродные проволоки и комбинированные электроды для дуговой сварки в защитных газах, под флюсом и для электрошлаковой сварки, присадочные материалы для различных способов сварки плавлением. В меньшей степени участвуют в формировании состава сварных швов флюсы и активные газы;
- материалы, непосредственно не участвующие в образовании металла шва: неплавящиеся электроды — угольные, графитовые, вольфрамовые; инертные защитные газы — аргон, гелий и др.; при электрической контактной сварке — электроды контактных машин.

Классификация сварочных материалов в связи с их большим разнообразием затруднена и до настоящего времени ни в России, ни в мире не разработана.

Общий объем применяемых в сварочном производстве материалов очень велик. Различных электродных (присадочных) проволок для сварки плавлением в мире в 2007 г. выпущено примерно 1 300 тыс. т. Из них приблизительно по 550 тыс. т пошло на изготовление более чем 500 тыс. т электродов для ручной дуговой сварки. В том же году было применено более 200 тыс. т различных сварочных флюсов. Расход защитных газов для дуговой сварки (в основном углекислого газа и аргона) в настоящее время составляет примерно 180 тыс. т в год.

Для газопламенной обработки металлов (кислородной резки и др.) в сварочном производстве широко используют кислород (сотни тысяч тонн в год) и другие горючие газы.

В меньшем объеме, но весьма разнообразной номенклатуры изготавливают и применяют другие сварочные материалы: неплавящиеся электроды для дуговой сварки, материалы электродов и губок контактных машин, специальные присадочные и электродные материалы.

Суммарное ежегодное потребление сварочных материалов в нашей стране составляет более 1 млн т. В соответствии с планами перспективного развития на ближайшие 15 лет предусматривается увеличение выпуска сварных конструкций. Это приведет к росту общего расхода сварочных материалов — их ежегодное производство, по предварительным оценкам, достигнет 2 млн т.

Не менее велико и качественное разнообразие сварочных материалов. Так, одной только стальной электродной проволоки, централизованно поставляемой металлургической промышленностью, насчитывается около 60 составов при различном сортаменте по размерам. Каждый периодический пересмотр нормативной документации увеличивает число марок электродной проволоки.

В последние годы в России количество марок штучных плавящихся электродов, применяемых для сварочных и наплавочных работ, составило несколько сотен. Примерно столько же наименований используется и в других технически развитых странах. Из этого количества около десяти марок применяется для изготовления конструкций из обычных сталей, составляющих по объему производства 90 %.

Другие марки в виде небольших или средних партий поставляются для специфических сварочных и наплавочных работ. К ним относятся электроды для сварки среднелегированных и особенно высоколегированных сталей, обеспечивающих получение специальных физических свойств металла швов, и электроды для сварки цветных металлов и сплавов, наплавочные. Именно эта группа электродов по мере развития производства сварных конструкций подвергается наиболее интенсивным исследованиям, так как находит разнообразное применение. Ряд марок со временем теряет свою актуальность, появляются и внедряются новые разработки — на замену старым и для решения новых задач.

Велика номенклатура сварочных флюсов: их используют при автоматической и полуавтоматической дуговой сварке под слоем флюса, по слою флюса (для алюминиевых сплавов), при газовой сварке, дуговой сварке неплавящимися электродами, пайке и других процессах. Среди них выделяются флюсы массового применения и флюсы со значительно меньшим объемом использования. В связи с отсутствием систематизированных данных о флюсах количество их марок установить трудно (вероятно, их приблизительно 100), и это число неуклонно растет, так как появление новых материалов требует разработки новых флюсов.

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

Многие сварочные материалы разрабатывают и изготавливают сами потребители. Хотя общее использование таких материалов в сварочном производстве невелико, влияние их правильного выбора на качество и эксплуатационные характеристики сварных конструкций может быть решающим.

Разработка новых материалов в основном базируется на проведении экспериментальных исследований, иногда очень трудоемких и дорогостоящих, и определяется рядом факторов, таких как стоимость материалов, технологичность их изготовления и применения, обеспечение заданных свойств сварных или паяных соединений при различных способах изготовления конструкции, дефицитность исходных материалов, особенности их поставки и т. д.

В связи с необходимостью сварки все более сложных материалов, применяемых в конструкциях, предназначенных для эксплуатации в разнообразных условиях: при различных механических нагрузках (статических и динамических), температурах в химически агрессивных средах и пр., создание новых сварочных материалов вызывает значительные трудности и требует немалых затрат. Для чисто эмпирических методов решения таких задач требуется большая экспериментальная проверка различных вариантов. Естественно, что любое сокращение числа вариантов хотя бы по принципу исключения, по общим соображениям или предварительным расчетам явно бесперспективных чрезвычайно целесообразно.

В учебном пособии приведены сведения по различным сварочным материалам, даны рекомендации по их выбору для выполнения сварных конструкций из сталей, титановых и алюминиевых сплавов, а также представлены методики расчета необходимого количества электродов, присадочного металла и защитных газов для выполнения сварных соединений.

СТАЛИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

1.1. СТРОЕНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

При наиболее распространенных способах сварки плавлением в результате действия источника сварочной теплоты образуется ванна расплавленного металла — сварочная ванна, которая после затвердевания — кристаллизации — обеспечивает создание металлической связи с нерасплавленными зонами свариваемых элементов. Распространение теплоты в свариваемых элементах приводит к нагреву того или иного объема, прилегающего к расплавленной зоне. По мере удаления от зоны нагрева подвижного источника сварочного нагрева температура металла снижается и в свариваемых изделиях значительных размеров достигает их начальной температуры (температуры окружающей среды). В тех объемах металла, которые получили при этом нагрев выше некоторой минимальной температуры, зависящей от состава свариваемого металла и его состояния перед сваркой (наличия наклепа, структуры закалки и т. п.), 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 разных условиях, в связи с чем к ним выдвигаются и различные требования.

В большинстве случаев основным требованием, предъявляемым к сварным соединениям, является обеспечение необходимой механической прочности конструкции. Кроме того, сварные соединения должны обеспечивать плотность (герметичность), химическую стойкость, жаропрочность и пр.

В ряде случаев требования бывают комплексными. Например, сварные соединения некоторых трубопроводов должны быть и прочными, и плотными; соединения корпусов судов — прочными, плотными и коррозионно-стойкими в слабоагрессивных средах (вода, морская вода); в химических агрегатах — прочными, плотными и химически стойкими в среде той или иной степени агрессивности.

С точки зрения гарантии свойств и служебных характеристик конструкции 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 и выйдет из строя. Поэтому для сварных соединений в целом необходимо, чтобы комплекс их свойств отвечал требуемой надежности в условиях эксплуатации. В связи с этим и все составляющие таких соединений должны обеспечивать высокую надежность сварных конструкций.

Рассмотрим схему поперечного сечения сварного соединения (рис. 1.1). Расплавившийся при сварке металл и впоследствии закристаллизовавшийся образует металл шва 1, имеющий литую структуру либо структуру литого металла, подвергнувшегося в некоторой своей части дополнительной термической обработке при последующих нагревах (в случае выполнения сварки в несколько проходов).

Металл шва своими кристаллами (образовавшимися при кристаллизации металлическими связями) связан с зернами нерасплавлявшегося при сварке основного металла, обычно не литого, а получившего перед сваркой термопластическую обработку (проковку, прокатку), иногда холодную пластическую (холодную прокатку, гибку и др.), а также термическую обработку (нормализацию, закалку и др.). Переход от металла шва к нерасплавлявшемуся при сварке основному металлу называется *границей сплавления* 2, хотя по существу она имеет линейную протяженность и является зоной сплавления. Такая зона включает в себя не только участок металла, расплавленного частично вследствие разницы температуры полного расплавления основного металла (ликвидус) и температуры начала его плавления (солидус), т. е. участок, где имело место двухфазное твердо-жидкое состояние, но и прилегающие к ней участки полностью нерасплавленного основного металла и металла шва, по химическому составу отличающиеся 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 гра-

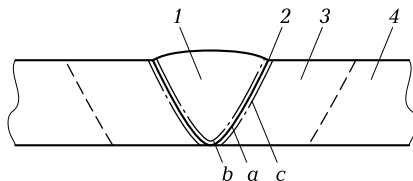


Рис. 1.1. Схема поперечного сечения сварного соединения:

1 — металл шва; 2 — граница сплавления; 3 — зона термического влияния; 4 — основной металл; *a* — видимая граница сплавления; *b*, *c* — невидимые участки специфических составов с химической неоднородностью по ширине участка *c–b*

ница сплавления, линиями *b* и *c* — невидимые участки специфических составов с химической неоднородностью по всей их ширине.

Далее от металла шва за зоной сплавления в сварном соединении располагается ЗТВ — 3. Металл этой зоны по химическому составу, как правило, 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 иметь измененную структуру и свойства.

Характер этих изменений в зависимости от состава свариваемого металла весьма различен. Так, у металлов и сплавов (медь, алюминий или некоторые сплавы на их основе), не имеющих изменений кристаллической решетки при нагреве (полиморфных превращений), поступивших на сварку в термически стабилизированном состоянии, в ЗТВ наблюдается укрупнение зерен, иногда изменение (часто утолщение) их границ. В некоторых случаях имеет место выпадение химических соединений, например: во многих аустенитных хромоникелевых сталях — 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 появление иных физико-механических свойств металла в сравнении с его исходным состоянием.

У металлов, обладающих полиморфизмом, в ЗТВ, как правило, заметно изменяется структура участков, где температура нагрева при сварке превосходила критические температуры, при которых устойчивая решетка низкотемпературной фазы перестраивается в кристаллическую решетку высокотемпературной. После обычного при сварке ускоренного охлаждения на этих участках при распаде высокотемпературной фазы получают неравновесные структуры продуктов распада со своими особыми свойствами.

Вся ЗТВ, как правило, неоднородна по структуре и на отдельных участках имеет заметно отличающиеся свойства. В некоторых случаях общая работоспособность сварного соединения определяется размером и свойствами некоторого участка ЗТВ.

За ЗТВ 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 свойства основного металла могут рассматриваться как эталон, их воспроизведение 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 и в некоторых случаях детально: основной металл — участок (составляющая) сварного соединения.

Для упрощения задачи пренебрежем общей характеристикой основного металла — сварного соединения и рассмотрим соотношение свойств основного металла — составляющей сварного соединения. В данном случае сравним не измененный термическим циклом основной металл с металлами ЗТВ, зоны сплавления и металлом швов. Начнем с последнего сопоставления.

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

Известно, что 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. Поскольку в ряде случаев даже относительно благоприятная литая структура сварного шва все же хуже улучшенной структуры основного металла, то одним из наиболее действенных средств является подбор химического состава металла шва, позволяющего 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 требуемые качества, например прочность, близкую к эталонной, основного металла.

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 др.) при конкретном способе сварки, поступивший через ванну в металл сварного шва. Выбирая для каждого определенного способа сварки соответствующие сварочные материалы, можно воздействовать на состав металла шва и, как следствие, обеспечивать его свойства, т. е. выбор сварочных материалов определяет возможность активного регулирования состава и свойств металла шва.

Состав зоны сплавления, как указано ранее, определяется прежде всего 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 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 ЗТВ в основном определяются термическим циклом, сопровождающим выполнение сварки и связанным со способом и режимом сварки. Степень концентрированности источника сварочной теплоты и его мощность влияют на локальность расплавления металла, размеры сварочной ванны, количество теплоты, отводимой в окружающий нерасплавляющийся металл, а значит, на 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 ЗТВ является правильный выбор способа и режима сварки.

Иногда на свойства металла ЗТВ и особенно наиболее нагреваемых при сварке участков, близких к границе сплавления, влияет и правильный выбор сварочных материалов. Это влияние определяется количеством водорода, диффундирующего из шва в ЗТВ, и полем собственных внутренних напряжений в околшовной зоне, связанным с соотношением составов и свойств металлов шва, а также ЗТВ. Пластические свойства сварных соединений, иногда невысокие сразу после сварки, 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 материалов.

К ряду изделий предъявляются специфические требования в отношении свойств поверхностей деталей, узлов или всей конструкции. Так, например, поверхности рельсов, направляющих станков и других изделий работают на истирание, абразивный износ. У других конструкций поверхности могут находиться в контакте с химически агрессивными газами или жидкостями (их металл должен быть химически стойким). Эти условия могут усложняться одновременным действием повышенных температур и ударного механического воздействия (например, при работе клапанов двигателей). Такие детали или узлы конструкции должны иметь не только определенную форму (что достигается применением соответствующим

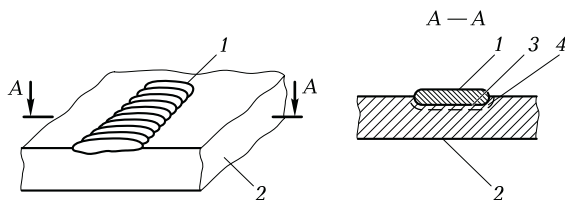


Рис. 1.2. Схема наплавки на деталь:

1 — наплавка; 2 — основной металл; 3 — зона (граница) сплавления; 4 — зона термического влияния

ющей технологии изготовления заготовок и механической их обработкой) и механическую прочность (обеспечиваемую свойствами металла детали и ее размерами). Необходимо, чтобы некоторые их поверхности обладали специфическими свойствами.

Одним из наиболее эффективных способов получения таких деталей (изделий) является комбинирование в них двух металлов, причем из одного делается основная часть детали, обеспечивающая ее форму, габаритные размеры, прочность, а из другого — поверхности, работающие в особых условиях. Например, широко распространена наплавка, при которой на соответствующие поверхности сварочными методами наплавляют слои металла, имеющего необходимые свойства. Схематически наплавка части поверхности плоской детали показана на рис. 1.2.

Наплавка 1, осуществленная сварочными методами на основной металл 2, имеет зону сплавления 3 и ЗТВ 4.

В связи с тем, что к слою наплавки 1, прежде всего к его поверхности, предъявляются специфические требования, особое внимание уделяют выбору состава металла наплавки. Он будет радикально отличаться от состава основного металла 2, только если применить специальные наплавочные материалы.

Таким образом, активно влиять на состав, а следовательно, и на свойства наплавленных слоев поверхностей позволяет выбор сварочных (наплавочных) материалов. При этом необходимо учитывать сварочные свойства материала, на который производится наплавка, так как довольно часто определяющими являются не свойства наплавленного материала, а те дефекты, которые возникают в районе зоны сплавления (трещины, отколы).

1.2. КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ

Конструкционные стали должны обладать высокой конструктивной прочностью, обеспечивать длительную и надежную работу

изделия в условиях эксплуатации. Поэтому особенность требований, предъявляемых к конструкционным материалам, состоит в обеспечении не одной какой-либо характеристики, а комплекса необходимых механических свойств.

Материалы, идущие на изготовление конструктивных элементов, деталей машин и механизмов, наряду с высокой прочностью и пластичностью должны обеспечивать хорошее сопротивление ударным нагрузкам, обладая достаточным запасом вязкости. При знакопеременных нагрузках — высокое сопротивление усталости, при трении — сопротивление изнашиванию, а во многих случаях — сопротивление коррозии.

Учитывая, что в деталях всегда имеются дефекты, являющиеся концентраторами напряжений, конструкционные материалы должны обладать высоким сопротивлением хрупкому разрушению и распространению трещин.

Помимо надежности и конструктивной прочности конструкционные материалы должны обладать высокими технологическими свойствами, среди которых хорошие литейные качества и свариваемость, обрабатываемость давлением, резанием. Конструкционные материалы должны иметь низкую стоимость и не содержать дефицитных легирующих элементов.

Из всех материалов, применяемых в настоящее время и планируемых к использованию в ближайшем будущем, только *сталь* позволяет получать сочетание высоких значений различных механических характеристик и хорошую технологичность при сравнительно невысокой стоимости. Поэтому сталь является основным и наиболее распространенным конструкционным материалом. Легирование позволяет повысить уровень ее механических свойств.

Различают следующие виды конструкционных сталей: углеродистые, строительные, цементируемые, улучшаемые, высокопрочные, рессорно-пружинные, подшипниковые, износостойкие, судостроительные, для пищевой промышленности.

Автоматные стали, полученные по ГОСТ 1414—75 «Прокат из конструкционной стали высокой обрабатываемости резанием. Технические условия», применяют для массового изготовления крепежа на станках-автоматах. Основное требование к ним — хорошая обрабатываемость резанием, достигаемая за счет увеличения содержания серы и фосфора до 0,2%, а также добавления селена и свинца. Маркируются автоматные стали буквой «А» и двумя цифрами, показывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента: А12, А20, А30.

При введении свинца в количестве 0,15...0,3% автоматные стали маркируются буквами «АС» и цифрами, показывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента: АС11, АС14.

Углеродистые конструкционные стали подразделяют на два класса: обыкновенного качества и качественные. В зависимости от условий и степени раскисления различают следующие их виды.

Спокойные стали, получаемые полным раскислением металла в печи, а затем в ковше. Эти стали содержат минимальное количество закиси железа, что обеспечивает «спокойное» застывание металла в изложнице, происходящее с уменьшением объема. В верхней части слитка образуются усадочная раковина и околоусадочная рыхлость, удаляемые отрезкой или отрубкой при прокатке.

Кипящие стали, полностью не раскисленные и содержащие поэтому до затвердевания повышенное количество оксида железа FeO. При застывании в изложнице оксид железа FeO реагирует с углеродом металла, образуя оксид углерода CO. Выделение этих пузырьков в металле создает впечатление, что он кипит. В слитке кипящей стали образуется большое количество газовых пузырей, вследствие чего практически отсутствует усадочная раковина. Если пузырьки имеют чистые неокисленные стенки, то они завариваются при горячей прокатке.

Кипящие стали более дешевы, так как при их производстве отходы минимальны. По сравнению со спокойной и полуспокойной сталью они больше склонны к старению и хладноломкости и хуже свариваются. Но вместе с тем кипящие стали обладают высокой пластичностью и хорошо принимают вытяжку в холодном состоянии.

Полуспокойные стали представляют собой промежуточный тип сталей. В настоящее время они находят все более широкое применение.

Кипящие стали при маркировке дополнительно обозначают «кп», полуспокойные — «пс» и спокойные — «сп».

Стали обыкновенного качества — наиболее дешевые. В процессе выплавки они меньше очищаются от вредных примесей и содержат больше серы и фосфора. Кроме того, их отливают в крупные слитки, поэтому в них наблюдается значительная ликвация (неравномерное распределение легирующих элементов и примесей) и они нередко содержат большое количество неметаллических включений.

Стали обыкновенного качества используют для изготовления изделий менее ответственного назначения: горячекатаного рядового проката (балки, прутки, швеллеры, уголки), а также листов, труб и поковок, работающих при невысоких напряжениях. Такие стали широко применяют для строительных и других сварных конструкций (балки, фермы конструкции подъемных кранов, корпуса сосу-

дов и аппаратов, каркасы котлов), для малоответственных деталей машин (оси, валы, шестерни, пальцы траков, втулки, валики, болты, гайки), не подвергающихся термической обработке или находящихся в термически обработанном состоянии. Многие детали (поршневые пальцы, толкатели, шестерни, червяки) из сталей обыкновенного качества определенного химического состава, работающие в условиях износа и не требующие высокой прочности сердцевин, цементируют или цианируют.

В зависимости от назначения и гарантируемых свойств стали обыкновенного качества подразделяют на три группы.

Группа А — стали, поставляемые с определенными механическими свойствами без уточнения их химического состава. Стали этой группы обозначаются буквами «Ст» (сталь) и цифрами от 1 до 6. Чем больше число в обозначении, тем больше содержание углерода, т. е. выше прочность и ниже пластичность.

Стали группы А используют в состоянии поставки без последующей обработки давлением или термической обработки, поскольку их химический состав, определяющий режимы обработки, может сильно колебаться.

К группе Б относят стали, поставляемые с гарантируемым химическим составом. В обозначение марки стали этой группы впереди ставится буква «Б».

Группа В — стали повышенного качества, которые поставляют с гарантированным химическим составом и механическими свойствами. В обозначение марки данной группы вводится буква «В». Стали группы В выплавляют следующих марок: ВСт2, ВСт3, ВСт4, ВСт5.

Стали групп Б и В применяют в случаях, когда изделие надо подвергнуть горячей деформации или упрочнить термической обработкой. Для определения режима обработки необходимо знать химический состав стали.

Сварные конструкции изготовляют главным образом из спокойных и полуспокойных сталей групп В. Для сталей, применяемых в сварных конструкциях, важна малая чувствительность к термическому старению, а для сталей, подвергаемых холодной правке и гибке, — малая склонность к деформационному старению.

Стали повышенного качества (группа В) имеют в основном специализированное назначение (мосто- и судостроение, сельскохозяйственное машиностроение) и поставляются по особым техническим условиям.

Механические свойства стали обыкновенного качества могут быть повышены термической обработкой (закалкой в воде с прокатного нагрева либо после специального нагрева или нормализацией). Например, термическое упрочнение листового проката из сталей Ст3, Ст3кп, Ст5 толщиной 8... 110 мм при охлаждении в воде

повышает предел текучести более чем в 1,5 раза при сохранении высокой пластичности.

Для строительных конструкций и машин, работающих в районах Севера, большое значение имеет температура перехода стали в хрупкое состояние. Порог хладноломкости для случая полностью хрупкого излома наиболее распространенной мартеновской стали Ст3 (листовая сталь) составляет для кипящей стали 0 °С и спокойной –40 °С. Поэтому применение кипящих, а также полуспокойных сталей для северных районов недопустимо. Понижение порога хладноломкости спокойной стали до –100 °С возможно путем закалки и высокого отпуска (улучшения) или нормализации. В связи с этим строительные конструкции и машины, предназначенные для работы в низкотемпературных условиях, изготавливают из спокойной, термически обработанной стали.

Качественные машиностроительные углеродистые стали получают кислородно-конверторным способом в электро- или мартеновских печах. В зависимости от степени раскисления они бывают спокойными или кипящими. Качественные стали выплавляют с соблюдением более строгих условий в отношении состава шихты и ведения плавки и разливки. К сталям данной группы предъявляют более высокие требования относительно состава (ограничены пределы содержания углерода, уменьшено содержание серы (не более 0,04 %) и фосфора (не более 0,04)), количества неметаллических включений, макро- и микроструктуры.

Качественные углеродистые стали маркируют цифрами 08; 10; 15; 20; ...; 85, которые указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Низкоуглеродистые стали 08, 08кп, 10, 10кп обладают невысокой прочностью и высокой пластичностью. Эти стали без термической обработки применяют для малонагруженных деталей (прокладки, шайбы, капоты тракторов, змеевики), элементов сварных конструкций, штампованных изделий. Штампуемость стали тем хуже, чем больше в ней углерода. Кремний, повышая предел текучести, снижает штампуемость, прежде всего способность принимать вытяжку. Поэтому для холодной штамповки, особенно для вытяжки, более широко используют холоднокатаные кипящие стали 08кп, 08Фкп (легирована ванадием).

Штампуемость в сильной степени зависит от величины зерна феррита. Штампуемость резко снижается при выделении по границам зерна третичного цемента.

Стали 15, 20, 20кп, 25 применяют без термической обработки или в нормализованном виде. Они поступают в виде проката, поковок, труб, листов, ленты и проволоки и предназначаются для менее ответственных деталей. Эти стали хорошо свариваются. Их также используют для цементируемых деталей, работающих на износ и не испытывающих высоких нагрузок, например кулачковых

валиков, рычагов, осей, втулок, малонагруженных шестерен, шпинделей, вилок и валиков переключения передач, толкателей клапанов, пальцев рессор и других деталей автотракторного, сельскохозяйственного и общего машиностроения.

После цементации эти стали подходят для изготовления деталей с высокой поверхностной твердостью, но невысокой прочностью сердцевины.

Стали с содержанием углерода до 0,25 % относятся к низкоуглеродистым; 0,26...0,45 % — к среднеуглеродистым; 0,45...0,75 % — к высокоуглеродистым. Углеродистые стали отличаются плохой свариваемостью, поэтому их не применяют для изготовления сварных конструкций. Температурная область их применения составляет от -40 до +425 °С.

Углеродистую конструкционную сталь обыкновенного качества поставляют без термической обработки, в горячекатаном состоянии. Изготовленные из нее конструкции, как правило, также не подвергают последующей термической обработке. Химический состав некоторых углеродистых конструкционных сталей (обыкновенного качества и качественных) представлен в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Химический состав углеродистых конструкционных сталей

Марка стали	ГОСТ	Массовая доля компонентов, %		
		C	Mn	Si
Ст1кп	380—2005	0,06...0,12	0,25...0,50	≤ 0,05
Ст1пс		0,06...0,12	0,25...0,50	0,05...0,15
Ст1сп		0,06...0,12	0,25...0,50	0,15...0,30
Ст2кп		0,09...0,15	0,25...0,50	≤ 0,05
Ст2пс		0,09...0,15	0,25...0,50	0,05...0,15
Ст2сп		0,09...0,15	0,25...0,50	0,15...0,30
Ст3пс		0,14...0,22	0,40...0,65	0,05...0,15
Ст3сп		0,14...0,22	0,40...0,65	0,15...0,30
10	1050—88	0,07...0,14	0,35...0,65	0,17...0,37
15		0,12...0,19	0,35...0,65	0,17...0,37
20		0,17...0,24	0,35...0,65	0,17...0,37
15Г	4543—71	0,12...0,19	0,70...1,00	0,17...0,37
20Г		0,17...0,24	0,70...1,00	0,17...0,37
35Г		0,32...0,40	0,70...1,00	0,17...0,37

Марка стали	ГОСТ	Массовая доля компонентов, %		
		C	Mn	Si
12К	5520—79	0,08 ... 0,16	0,40 ... 0,70	0,17 ... 0,37
15К		0,12 ... 0,20	0,35 ... 0,65	0,15 ... 0,30
20К		0,16 ... 0,24	≤0,65	0,15 ... 0,30
22К		0,19 ... 0,26	1,00	0,17 ... 0,40
СтЗС	5521—93	0,14 ... 0,22	0,35 ... 0,60	0,12 ... 0,35

Примечания: 1. Массовая доля хрома, никеля и меди в сталях марок Ст1, Ст2 и Ст3 различной выплавки должна быть не более 0,30 % каждого, серы — не более 0,050 %, фосфора — не более 0,70 %.

2. Для проката из стали марок СтЗкп, СтЗпс, СтЗсп, предназначенного для сварных конструкций, увеличение содержания углерода не допускается.

3. ГОСТ 380—2005 «Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки»; ГОСТ 1050—88 «Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия»; ГОСТ 4543—71 «Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия»; ГОСТ 5520—79 «Прокат листовой из углеродистой, низколегированной и легированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением. Технические условия»; ГОСТ 5521—93 «Прокат стальной для судостроения. Технические условия».

Конструкционные стали с нормальным и повышенным содержанием марганца (марки 15Г и 20Г) имеют пониженное содержание серы. Механические свойства некоторых марок углеродистой конструкционной стали приведены в табл. 1.2. Стали этой группы для изготовления сварных конструкций обычно применяют в горячекатаном состоянии и реже — после термической обработки, нормализации или закалки с отпуском (термоупрочнение). Механические свойства таких сталей зависят от термической обработки.

Легированными называются стали, содержащие специально введенные элементы. Марганец считается легирующим элементом при содержании его в стали более 0,7 %, а кремний — свыше 0,4 %. Поэтому углеродистые стали марок СтЗГпс, 15Г и 20Г с повышенным содержанием марганца относятся к низколегированным конструкционным сталям. Легирующие элементы, вводимые в сталь, вступают во взаимодействие с железом и углеродом, изменяя ее свойства. При этом повышаются механические свойства стали и, в частности, снижается порог хладноломкости. В результате появляется возможность снизить массу изделия.

Низкоуглеродистые низколегированные конструкционные стали широко используют при производстве сварных конструкций. Суммарное содержание легирующих элементов в этих сталях обычно не превышает 4,0 %, углерода — 0,25 % (табл. 1.3 и 1.4). Низ-

Таблица 1.2. Механические свойства углеродистых конструкционных сталей в холодном состоянии

Марка стали	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа				δ_5 , %		
		Толщина, мм						
		до 20	20... 40	40... 100	свыше 100	до 20	20... 40	свыше 40
Ст1кп	310 ... 400	—	—	—	—	35	34	32
Ст1пс	320 ... 420	—	—	—	—	34	33	31
Ст2кп	330 ... 420	220	210	200	190	33	32	30
Ст2пс	340 ... 440	230	220	210	200	32	31	29
Ст3кп	370 ... 470	240	230	220	200	27	26	24
Ст3сп	380 ... 490	250	240	230	210	26	25	23
Ст3Гпс	380 ... 500	250	240	230	210	26	25	23
10	330	205	—	—	—	31	—	—
15	370	225	—	—	—	27	—	—
15Г	410	245	—	—	—	26	—	—
20Г	450	280	—	—	—	24	—	—
35Г	570	340	—	—	—	18	—	—

Примечания: 1. $\sigma_{в}$ — временное сопротивление (предел прочности при растяжении); $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести; δ_5 — относительное удлинение на образцах с пятикратным отношением длины к диаметру.

2. Для сталей марок 10, 15, 20, 15Г и 20Г механические свойства определены на образцах из нормализованных заготовок.

колегирированные стали в зависимости от вводимых в сталь легирующих элементов подразделяют на марганцевые, кремнемарганцевые, хромокремненикельмедистые и т. д.

Наличие марганца в сталях повышает ударную вязкость и хладноломкость, обеспечивая удовлетворительную свариваемость. По сравнению с другими низколегированными сталями марганцевые стали позволяют получить сварные соединения более высокой прочности при знакопеременных и ударных нагрузках. Введение в низколегированные стали небольшого количества меди (0,3...0,4 %) повышает стойкость против атмосферной коррозии и коррозии в морской воде.

Для изготовления сварных конструкций низколегированные стали применяют в горячекатаном состоянии. Термическая обработка значительно улучшает механические свойства стали, но они зависят от толщины проката. При этом достигается значительное

Таблица 1.3. Химический состав низкоуглеродистых низколегированных конструкционных сталей

Марка стали	Массовая доля компонентов, %				Тип стали
	C	Si	Mn	Прочие	
09Г2	≤0,12	0,17...0,37	1,4...1,8	Cu ≤ 0,3	Марганцевые
14Г2	0,12...0,18	0,17...0,37	1,2...1,6	Cr ≤ 0,3	
18Г2	0,14...0,20	0,25...0,55	1,2...1,6	Ni ≤ 0,3	
12ГС	0,09...0,15	0,5...0,8	0,8...1,2	Cu ≤ 0,3	Кремне-марганцевые
16ГС	0,12...0,18	0,4...0,7	0,9...1,2		
17ГС	0,14...0,20	0,4...0,6	1,0...1,4		
092С	≤ 0,12	0,5...0,8	1,3...1,7		
10Г2С1	≤ 0,12	0,8...1,1	1,3...1,65		
10Г2С1Д	≤ 0,12	0,8...1,1	1,3...1,65	0,15...0,3 Cu; Ni ≤ 0,3; Cr ≤ 0,3	Кремне-марганцово-медистые
15ГФ	0,12...0,18	0,17...0,37	0,9...1,2	0,05...0,10 V	Марганцово-ванадиевая
14ХГС	0,11...0,16	0,4...0,7	0,9...1,3	0,5...0,8 Cr; Ni ≤ 0,3; Cu ≤ 0,3	Хромо-кремне-марганцовая
10ХСНД	≤ 0,12	0,8...1,1	0,5...0,8	0,6...0,9 Cr; 0,5...0,8 Ni; 0,4...0,65 Cu	Хромо-кремне-никель-медистые
15ХСНД	0,12...0,18	0,4...0,7	0,4...0,7	0,6...0,9 Cr; 0,3...0,6 Ni; 0,2...0,4 Cu	

Примечание. Содержание серы и фосфора не более 0,035 %.

Таблица 1.4. Механические свойства низкоуглеродистых низколегированных конструкционных сталей в состоянии поставки

Марка стали	КСУ, МДж/м ²	$\sigma_{в1}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %
		не менее		
09Г2	0,30	450	310	21
14Г2	0,34	470	340	21
18Г2	0,40	520	360	21
12ГС	—	470	320	26
16ГС	0,29	500	330	21
09Г2С	0,39	500	350	21
10Г2С1	0,40	520	380	21
15ГФ	0,39	520	380	21
14ХГС	0,39	500	350	22
10ХСНД	0,49	540	400	39
15ХСНД	0,39	500	350	39

- Примечания: 1. См. примеч. к табл. 1.2.
 2. КСУ — ударная вязкость.
 3. Состояние поставки — прокат толщиной 4 ... 10 мм.

снижение порога хладноломкости. Поэтому в последние годы некоторые марки сталей для производства сварных конструкций используют после упрочняющей термической обработки.

Свариваемость. Низкоуглеродистые и низкоуглеродистые низколегированные стали обладают хорошей свариваемостью. Свариваемость среднеуглеродистых сталей, используемых в нормализованном состоянии, затруднена, особенно при повышенной толщине металла. В некоторых случаях технология их сварки схожа с технологией сварки низколегированных сталей с повышенным содержанием углерода и должна обеспечивать комплекс требований, основные из которых — надежность и долговечность конструкций (преимущественно из термически упрочняемых сталей, обычно используемых в ответственных конструкциях).

Важное требование при сварке низкоуглеродистых и низкоуглеродистых низколегированных сталей — обеспечение равнопрочности сварного соединения с основным металлом и отсутствие дефектов в сварном шве. Для этого показатели механических свойств металла шва и околошовной зоны должны быть равны или превышать нижний предел соответствующих показателей основного металла.

При сварке данных сталей с применением необходимых сварочных материалов металл шва легирован кремнием и марганцем больше, чем основной металл. Его механические свойства в большинстве случаев выше, чем у основного металла. Поэтому основным требованием при сварке является получение сварного шва с заданными размерами и без дефектов.

Иногда условия работы изделий допускают снижение отдельных показателей механических свойств сварного соединения. Однако во всех случаях, особенно при сварке ответственных конструкций, швы не должны иметь трещин, непроваров, пор, подрезов. Геометрические размеры и форма швов должны соответствовать требуемым, а сварное соединение быть стойким против перехода в хрупкое состояние.

К сварному соединению могут предъявляться дополнительные требования (работоспособность при вибрационных и ударных нагрузках, пониженных температурах). Технология должна обеспечивать максимальную производительность и экономичность процесса сварки при требуемой надежности конструкции.

Механические свойства металла шва и сварного соединения зависят от его структуры, которая определяется химическим составом, режимом сварки, предыдущей и последующей термической обработкой. Химический состав металла шва при сварке свариваемых сталей незначительно отличается от состава основного металла (табл. 1.5). Это различие сводится к уменьшению в металле шва содержания углерода для предупреждения образования структур закалочного характера при повышенных скоростях охлаждения. В этом случае возможное снижение прочности металла шва компенсируется легированием металла через проволоку, покрытие или флюс марганцем, кремнием, а при сварке низколегированных сталей и за счет перехода этих элементов из основного металла.

Таким образом, химический состав металла шва зависит от доли участия в нем основного и дополнительного металлов и взаимодействий между металлом, шлаком и газовой фазой. Повышенные скорости охлаждения металла шва также способствуют повышению его прочности (рис. 1.3), однако при этом снижаются его пластические свойства и ударная вязкость. Это объясняется изменением количества и строения перлитной фазы.

Критическая температура перехода металла однослойного шва в хрупкое состояние практически не зависит от скорости охлаждения. Последняя определяется толщиной свариваемого металла, конструкцией сварного соединения, режимом сварки и начальной температурой детали.

Влияние скорости охлаждения в наибольшей степени проявляется при дуговой сварке однослойных угловых швов и последнего слоя многослойных угловых и стыковых швов при наложении их на

Таблица 1.5. Средний химический состав металла шва при сварке сталей Ст3 и 19Г различными способами

Способ сварки	Массовая доля компонентов, %		
	C	Si	Mn
<i>Сталь Ст3</i>			
Покрытыми электродами	0,08 ... 0,13	0,20 ... 0,25	0,30 ... 0,90
Под флюсом	0,12 ... 0,18	0,15 ... 0,40	0,65 ... 0,75
В углекислом газе плавящимся электродом	0,10 ... 0,16	0,20 ... 0,47	0,57 ... 0,79
Электродшлаковая	0,10 ... 0,16	0,07 ... 0,16	0,45 ... 0,60
<i>Сталь 19Г</i>			
Покрытыми электродами	0,09 ... 0,15	0,20 ... 0,30	0,40 ... 1,20
Под флюсом	0,10 ... 0,14	0,15 ... 0,30	0,90 ... 1,80

Примечание. В стали Ст3 содержится: C — 0,14 ... 0,22 %; Si — 0,05 ... 0,30; Mn — 0,40 ... 0,45 %; в стали 19Г: C — 0,16 ... 0,22 %; Si — 0,17 ... 0,37; Mn — 0,80 ... 1,15 %.

холодные, предварительно сваренные швы. Металл многослойных швов, кроме последних слоев, подвергающийся действию повторного термического цикла сварки, имеет более мелкозернистую структуру. Поэтому он обладает пониженной критической температурой перехода в хрупкое состояние. Пластическая деформация,

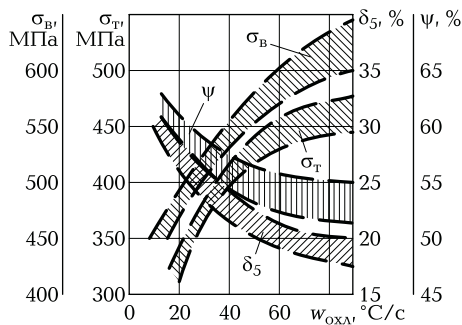


Рис. 1.3. Зависимость между скоростью охлаждения $w_{охл}$ и механическими свойствами металла шва при дуговой сварке низкоуглеродистых сталей:

σ_B — временное сопротивление; σ_T — предел текучести при растяжении; δ_5 — относительное удлинение образца с 5-кратным отношением длины к диаметру; ψ — относительное сужение площади поперечного сечения образца при разрыве

возникающая в металле шва под воздействием сварочных напряжений, также повышает предел текучести металла шва.

Обеспечение равнопрочности шва при дуговых способах сварки низкоуглеродистых и низколегированных нетермоупрочненных сталей обычно не вызывает затруднений. Механические свойства металла околошовной зоны зависят от конкретных условий сварки и вида термической обработки стали перед сваркой.

Как видно из данных табл. 1.6 и рис. 1.4, скорость охлаждения для низкоуглеродистых сталей оказывает большое влияние на их механические свойства. При повышении содержания марганца это влияние усиливается. Поэтому даже при сварке горячекатаной низкоуглеродистой стали марки СтЗкп не исключена возможность получения в сварном соединении закалочных структур. Если сталь перед сваркой прошла термическое упрочнение — закалку, то в зоне термического влияния шва на участках рекристаллизации и старения наблюдаем отпуск металла, т.е. снижение его прочностных свойств. Уровень изменения этих свойств зависит от погонной энергии, типа сварного соединения и условий сварки.

При сварке низколегированных сталей изменение свойств металла шва и околошовной зоны проявляется в большей степени. Сварка горячекатаной стали способствует появлению закалочных структур на участках перегрева и нормализации. Уровень изменения механических свойств металла выше, чем при сварке низкоуглеродистых сталей. Термическая обработка низколегированных сталей, наиболее часто — закалка (термоупрочнение) в целях повы-

Таблица 1.6. Влияние термической обработки на механические свойства стали

Марка	Вид термической обработки	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %
СтЗкп	Отжиг	194	393	35,9	61,0
	Нормализация	255	418	32,8	64,1
	Закалка:				
	в масле	318	506	29,4	68,5
в воде	421	588	18,2	67,9	
14Г2	Отжиг	294	503	34,9	67,2
	Нормализация	338	532	30,1	65,5
	Закалка:				
	в масле	528	739	23,4	61,6
в воде	880	1 014	13,6	50,4	

Примечания: 1. См. примеч. к табл. 1.2.

2. σ_T — предел текучести при растяжении; ψ — относительное сужение площади поперечного сечения образца при разрыве.

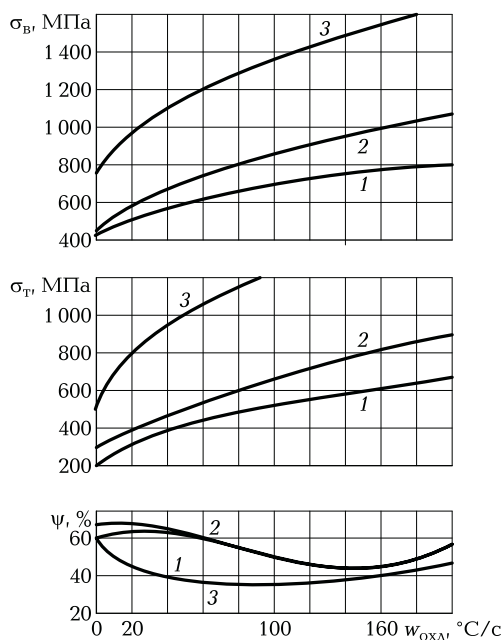


Рис. 1.4. Влияние скорости охлаждения $w_{\text{охл}}$ при температуре 550°C на механические свойства сталей:

1 — СтЗкп; 2 — 19Г; 3 — 14Г2; обозначения см. на рис. 1.3

шения их прочностных показателей при сохранении высокой пластичности (см. табл. 1.6) усложняет технологию сварки.

На участках рекристаллизации и старения происходит разупрочнение стали под действием высокого отпуска с образованием структур преимущественно троостита или сорбита отпуска. Это разупрочнение тем больше, чем выше была прочность основного металла, полученная после термической обработки. При температурах выше критической точки A_{c3} разупрочнение обусловлено совместно протекающими процессами высокого отпуска и фазовой перекристаллизации. В этих процессах решающее значение имеют скорость охлаждения металла шва (см. рис. 1.4) и погонная энергия при сварке (табл. 1.7).

Таким образом, при сварке низколегированных сталей (особенно термоупрочненных) получение равнопрочного сварного соединения вызывает затруднения и поэтому требует применения определенных технических приемов (сварка короткими участками нетермоупрочненных сталей и длинными — термоупрочненных сталей). Протяженность участков зоны термического влияния, где произошло заметное изменение свойств основного металла под действием термического цикла сварки (разупрочнение или зака-

Таблица 1.7. Влияние погонной энергии сварки на временное сопротивление σ_B сварных соединений из термоупрочненной стали 14ХГС

Толщина стали, мм	σ_B , МПа, при сварке с погонной энергией, МДж/м	
	1,68	0,84
12	651	736
20	734	776

ка), зависит от способа и режима сварки, состава и толщины металла, конструкции сварного соединения и др.

Повышение погонной энергии сварки (рис. 1.5) сопровождается расширением разупрочненной зоны и снижением твердости металла в ней. Это вызвано увеличением объема металла, подвергавшегося высокому сварочному нагреву, и замедлением темпа охлаждения. Кроме того, повышение погонной энергии снижает скорость охлаждения в субкритическом интервале температур, что уменьшает количество неравновесных структур (понижает твердость) в прилегающих к шву участках перегрева. Околошовная зона, где наиболее резко выражены явления перегрева и закалки, — вероятное место образования холодных трещин при сварке низколегированных сталей.

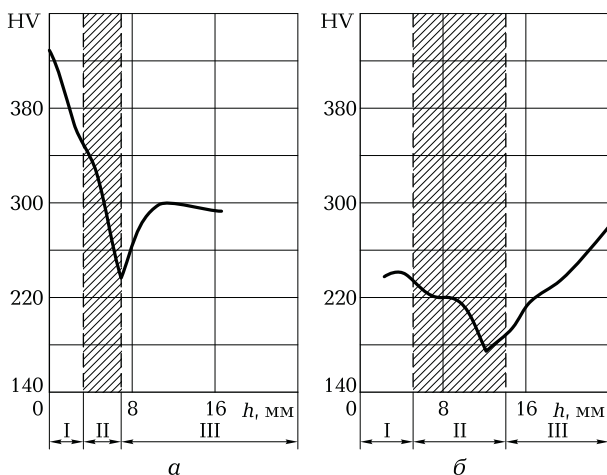


Рис. 1.5. Влияние погонной энергии сварки q/v на распределение твердости металла HV по поперечному сечению шва для стали 14ХГС:

$a - q/v = 0,882$ МДж/м; $b - q/v = 44,956$ МДж/м; q — количество теплоты; v — длина сварного шва; h — расстояние от оси сварного шва в его поперечном сечении; I — шов; II — зона перекристаллизации; III — основной металл

В процессе изготовления конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей на заготовительных операциях и при сварке в зонах, удаленных от высокотемпературной области, возникает холодная пластическая деформация. Попадая при наложении последующих швов под сварочный нагрев до температур $\approx 300^\circ\text{C}$, эти зоны становятся участками деформационного старения, приводящего к снижению пластических и повышению прочностных свойств металла и возможному возникновению трещин, особенно при низких температурах или в концентраторах напряжений.

Высокий отпуск при температурах $600\dots 650^\circ\text{C}$ в этих случаях служит эффективным средством восстановления свойств металла (рис. 1.6). Высокий отпуск применяют и для снятия сварочных напряжений. Нормализации подвергают сварные конструкции для улучшения структуры отдельных участков сварного соединения и выравнивания их свойств. Термическая обработка, кроме закалки сварных соединений, в которых шов и околошовная зона охлаждались с повышенными скоростями, приведшими к образованию на некоторых участках неравновесных структур закалочного характера (угловые однослойные швы, последние проходы, выполненные на полностью остывших предыдущих), приводит к снижению прочностных и повышению пластических свойств металла в этих участках (см. табл. 1.6).

При сварке короткими участками по горячим предварительно наложенным швам замедленная скорость охлаждения металла шва и околошовной зоны способствует получению равновесных структур. Влияние термической обработки в этом случае сказывается незначительно. При электрошлаковой сварке, когда скорость остывания металла шва околошовной зоны сопоставима со скоростями охлаждения при термической обработке, последующая термическая обработка мало изменяет механические свойства металла рас-

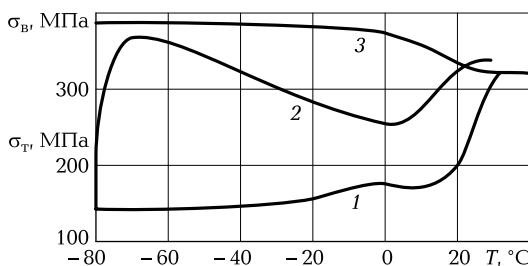


Рис. 1.6. Свойства стали СтЗкп в зависимости от термической обработки и деформационного старения:

1 — исходное горячекатаное состояние; 2 — после 10%-ной деформации растяжением при 250°C ; 3 — после 10%-ной деформации растяжением при 250°C и последующего отпуска при 650°C ; остальные обозначения см. на рис. 1.3

смаатриваемых зон. Однако нормализация приводит к резкому возрастанию ударной вязкости.

Швы, сваренные на низкоуглеродистых сталях всеми способами сварки, обладают удовлетворительной стойкостью против образования кристаллизационных трещин. Это обусловлено низким содержанием в них углерода. Однако для низкоуглеродистых сталей, содержащих углерод по верхнему пределу (свыше 0,20 %), при сварке угловых швов и первого корневого шва в многослойных швах, особенно с повышенным зазором, возможно образование кристаллизационных трещин, что связано в основном с неблагоприятной формой провара (узкая глубокая форма провара с коэффициентом формы 0,8... 1,2). Легирующие добавки в низколегированных сталях могут повышать вероятность образования кристаллизационных трещин.

Низкоуглеродистые и низколегированные стали хорошо свариваются практически всеми способами сварки плавлением.

Сварку среднеуглеродистых сталей выполняют так, чтобы снизить содержание углерода в металле шва, что достигается применением присадочной проволоки с низким содержанием углерода и уменьшением доли основного металла в шве. Кроме того, обеспечивают получение шва с большим коэффициентом формы, выбирая режимы сварки и число слоев с учетом получения минимальной зоны термического влияния, предупреждения роста зерна в зоне перегрева и по возможности отсутствия хрупких закалочных структур. Последнее достигается предварительным подогревом до 250... 300 °С. Многослойная, а также двухдуговая сварка в отдельные сварочные ванны способствуют получению качественных сварных соединений.

Высокоуглеродистые стали обладают плохой свариваемостью, и их практически не применяют для изготовления сварных конструкций. Необходимость сварки подобных сталей возникает при ремонтных работах и выполняется при предварительном подогреве до 450... 600 °С покрытыми электродами или полуавтоматами.

1.4. НИЗКО- И СРЕДНЕЛЕГИРОВАННЫЕ ЗАКАЛИВАЮЩИЕСЯ СТАЛИ

Состав и свойства. В машиностроении широко используют углеродистые и низколегированные стали, содержание углерода в которых увеличено по сравнению с низкоуглеродистыми конструкционными сталями общего назначения, что при соответствующей термообработке позволяет существенно повысить их прочность. В зависимости от режима термической обработки временное сопротивление этих сталей составляет 600... 1 500 МПа. Содержание

углерода в них доходит до 0,5 % при суммарном легировании другими элементами до 4 %. Примеры марок сталей этой группы: 35ХМ, 40ХГ, 14Х2ГМ, 30ХГТ, 30ХГНА, 30ХГСА, 30ХН2МФА. По чувствительности к циклу сварки к этой же группе относятся углеродистые стали, например, марок 30, 35, 40, 45, 50, и теплоустойчивые молибденовые и хромомолибденовые стали, например, марок 20ХМ, 30ХМА.

Химический состав указанных сталей представлен в табл. 1.8, а механические свойства в термообработанном состоянии — в табл. 1.9.

Повышение содержания углерода, а также степени легирования стали увеличивает склонность к закалке. Такие стали обладают высокой чувствительностью к термическому циклу сварки, и околошовная зона оказывается закаленной при всех режимах сварки, обеспечивающих удовлетворительное формирование шва.

Таблица 1.8. Химический состав низко- и среднелегированных закаливающихся сталей

Марка стали	Массовая доля основных компонентов, %			
	C	Mn	Si	Cr
35ХМ	0,32 ... 0,40	0,40 ... 0,70	0,17 ... 0,37	0,80 ... 1,10
40ХГ	0,37 ... 0,45	0,90 ... 1,20	0,17 ... 0,37	0,90 ... 1,20
14Х2ГМ	0,13 ... 0,18	0,80 ... 1,10	0,17 ... 0,37	1,40 ... 1,70
30ХГТ	0,32 ... 0,40	0,80 ... 1,10	0,17 ... 0,37	1,00 ... 1,30
30ХГНА	0,28 ... 0,35	0,60 ... 0,90	0,17 ... 0,37	0,90 ... 1,20
30ХГСА	0,28 ... 0,34	0,80 ... 1,10	0,90 ... 1,20	0,80 ... 1,10
30ХН2МФА	0,27 ... 0,34	0,30 ... 0,60	0,17 ... 0,37	0,60 ... 0,90

Продолжение табл. 1.8

Марка стали	Массовая доля основных компонентов, %			
	Ni	Mo	V	Ti
35ХМ	0,30	0,15 ... 0,25	—	—
40ХГ	≤ 0,25	—	—	—
14Х2ГМ	≤ 0,25	0,40 ... 0,55	—	—
30ХГТ	≤ 0,25	—	—	0,06 ... 0,12
30ХГНА	0,30 ... 0,60	—	—	—
30ХГСА	0,30	—	—	—
30ХН2МФА	2,0 ... 2,40	0,20 ... 0,30	0,10 ... 0,18	—

Таблица 1.9. Механические свойства низко- и среднелегированных закаливающихся сталей

Марка стали	Вид термической обработки	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, МДж/м ²
		не менее				
35ХМ	Закалка при 850 °С, отпуск при 560 °С	950	850	12	45	0,8
40ХГ	Закалка при 840 °С, отпуск при 520 °С	1 000	850	9	45	0,6
30ХГТ	Закалка при 880 °С, отпуск при 200 °С	1 500	1 300	9	45	0,6
30ХГНА	Закалка при 880 °С, отпуск при 500 °С	1 100	850	10	45	0,7
30ХГСА	Изотермическая закалка при 880 °С в смеси калиевой и натриевой селитры при 280...310 °С. Затем охлаждение на воздухе	1 650	1 400	10	40	0,5
30ХН2МФА	Закалка, отпуск при 680 °С	900	800	10	40	0,9

Примечание. См. примеч. 1 к табл. 1, 2, примеч. 2 к табл. 1.4, примеч. 2 к табл. 1.6.

Свариваемость. Для снижения скорости охлаждения околошовной зоны с целью получения в ней структур, обладающих некоторым запасом пластичности, достаточным для предотвращения образования трещин под действием термического цикла, при сварке низко- и среднелегированных сталей необходим предварительный подогрев свариваемого узла.

Закаливаемость стали можно оценить, изучая кинетику распада аустенита. На рис. 1.7 представлена диаграмма изотермического распада аустенита и нанесены кривые, соответствующие различным скоростям охлаждения металла (T — температура, t — время). Скорость охлаждения по кривой 2 является максимальной скоростью охлаждения, превышение которой приводит к частичной за-

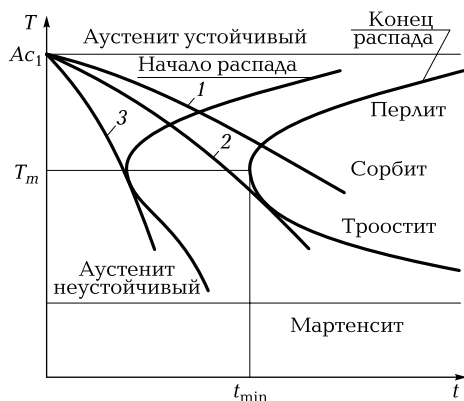


Рис. 1.7. Диаграмма изотермического распада аустенита:
 A_{c1} — критическая точка начала распада аустенита

калке стали. Ее называют первой критической скоростью охлаждения. При скорости охлаждения по кривой 3 наступает полная закалка (100 % мартенсита). Ее называют второй критической скоростью охлаждения. Кривая 1 характеризует скорость охлаждения, при которой отсутствует закалка.

Характер кривых изотермического распада аустенита и их расположение на диаграмме зависят от химического состава стали, однородности аустенита и размера его зерна. Почти все легирующие элементы увеличивают устойчивость аустенита, т. е. сдвигают кривые изотермического распада вправо.

При переохлаждении аустенита ниже критической точки A_{c1} длительность инкубационного периода будет зависеть от температуры переохлаждения. При некоторой температуре T_m наблюдается наименьшая устойчивость аустенита, и через время выдержки t_{min} при этой температуре полностью заканчиваются все превращения. При всех других температурах переохлаждения время инкубационного периода больше, поэтому T_m называют температурой наименьшей устойчивости аустенита. При использовании кривых изотермического распада аустенита для оценки закаливаемости стали в условиях непрерывного охлаждения при сварке необходимо в эти кривые внести некоторые поправки.

При непрерывном охлаждении (рис. 1.8) температура наименьшей устойчивости аустенита снижается в среднем на 55°C ($T'_m = T_m - 55$), а наименьшая длительность распада увеличивается в 1,5 раза ($t'_m = 1,5t_m$) по сравнению с тем, что наблюдается при изотермическом распаде. При одном и том же химическом составе рост зерна аустенита замедляет его распад. Например, если средняя площадь зерна углеродистой стали с содержанием углерода 0,9 % увеличивается в 10 раз, длительность распада увеличивается примерно вдвое.

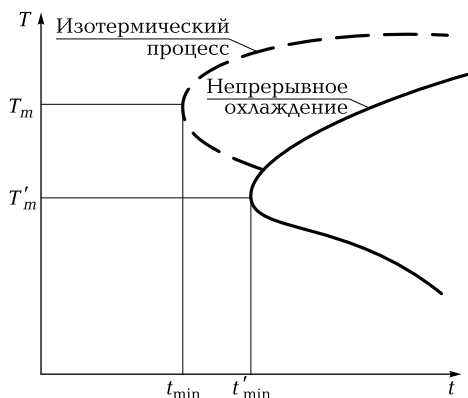


Рис. 1.8. Смещение критических точек кривых изотермического распада аустенита при непрерывном охлаждении

Пользуясь диаграммой изотермического распада, можно приближенно рассчитать скорость охлаждения в субкритическом интервале температур, обеспечивающую полное или частичное отсутствие закалки металла околошовной зоны. Для получения в околошовной зоне металла, в котором будут отсутствовать структуры закалки, необходимо, чтобы средняя скорость охлаждения в интервале температур от T_1 до $(T_m - 55)$ не превышала предельного, критического, значения:

$$w_{кр} = [T_1 - (T_m - 55)] / (3t_{min}),$$

где T_1 — температура, соответствующая точке A_{C_1} ; T_m — температура минимальной устойчивости аустенита; t_{min} — минимальное время полного изотермического распада аустенита.

Коэффициент 3 в знаменателе состоит из двух множителей — 1,5 и 2: первый из них вводит поправку на непрерывность охлаждения, второй учитывает замедление распада аустенита из-за роста зерна, сопутствующего сварочному нагреву.

При сварке плавлением скорость нагрева в интервале температур между критическими точками A_{C_1} — A_{C_3} и длительность пребывания металла околошовной зоны при температуре выше A_{C_3} оказывают существенное влияние на процесс гомогенизации аустенита и рост зерна. Существует два возможных варианта развития процесса. Первый вариант: высокая температура нагрева металла околошовной зоны способствует росту зерна, особенно при большой длительности пребывания металла при температуре выше A_{C_3} , и одновременно увеличивает устойчивость аустенита. Второй вариант: быстрый нагрев и малая длительность пребывания металла выше температуры A_{C_3} понижают степень гомогенизации и устойчивость аустенита.

В сталях без карбидообразующих элементов или с малым их содержанием преимущественное развитие получает первый вариант, что приводит к смещению области частичной закалки в сторону меньших скоростей охлаждения. В сталях, легированных карбидообразующими элементами, возможно смещение области частичной закалки в сторону больших скоростей охлаждения вследствие ограничения роста зерна и развития процесса гомогенизации по второму варианту.

Для проверки выбранного режима и определения температуры подогрева при сварке закаливающихся сталей используют результаты стандартных испытаний стали по методике ИМЕТ-1 (термические циклы с одновременным деформированием) или валиковой пробы, на основании которых получают зависимости изменения механических свойств металла околошовной зоны от скорости охлаждения и длительности пребывания выше A_{c3} . По этим данным устанавливают интервал скоростей охлаждения, ограничивающий область частичной закалки стали в ЗТВ, и выбирают расчетное значение по допускаемому проценту мартенсита в структуре и требуемому сочетанию механических свойств. При сварке сталей повышенной прочности содержание мартенсита в структуре металла ЗТВ, как правило, ограничивают 20...30%. Большой процент содержания мартенсита (иногда до 50%) допускается лишь при сварке изделий с малой жесткостью при обязательной последующей термической обработке.

Теория распространения теплоты при сварке позволяет рассчитывать скорости охлаждения и время пребывания металла ЗТВ в определенном интервале температур.

С целью быстрого определения фактической скорости охлаждения при наплавке валика на лист для некоторых частных случаев расчеты можно выразить в виде номограммы. На рис. 1.9 приведена номограмма для расчета скорости охлаждения околошовной зоны при толщине металла 5...36 мм. Диапазон скоростей охлаждения металла ЗТВ, в котором не возникают трещины и получается удовлетворительное сочетание механических свойств, приведен в табл. 1.10.

Сварка на режимах, при которых скорость охлаждения околошовной зоны больше верхнего предела, вызывает резкое снижение пластичности металла ЗТВ за счет ее закалки; режимы, приводящие к слишком малой скорости охлаждения (меньше нижнего предела, указанного в табл. 1.10), снижают пластичность и вязкость вследствие чрезмерного роста зерна. Если сталь подвержена резкой закалке, то возможно, что при всех скоростях охлаждения в околошовной зоне образуется мартенситная структура в таком количестве, при котором пластичность металла будет низкой.

Уменьшение скорости охлаждения ниже некоторого предела, при котором не происходит образование мартенсита, приводит к

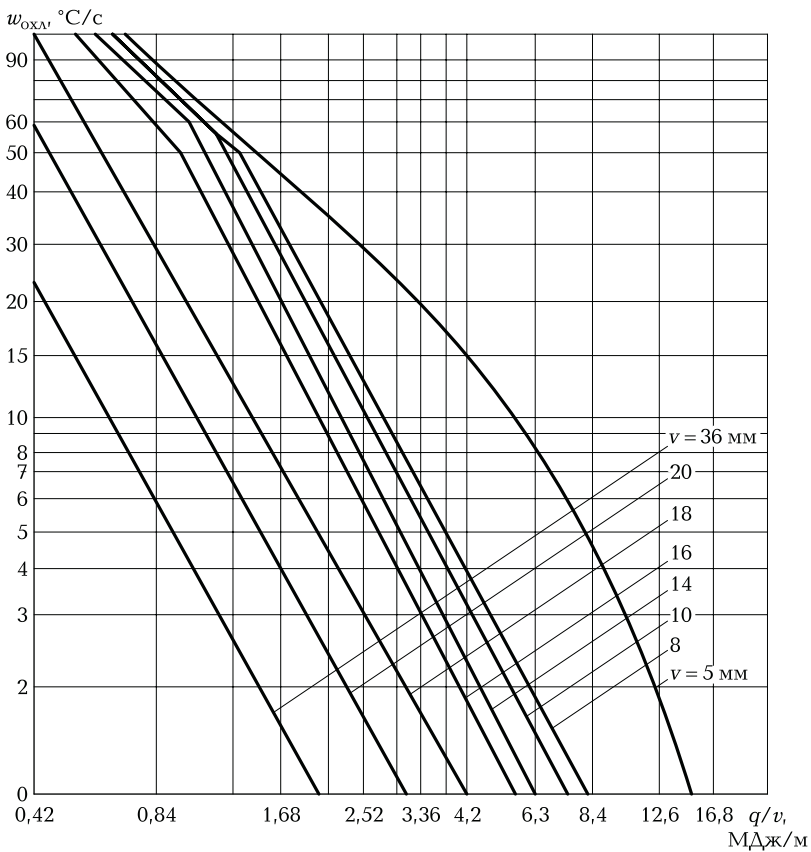


Рис. 1.9. Номограмма для расчета скорости охлаждения $w_{\text{охл}}$ околошовной зоны при $T = 500\text{ }^\circ\text{C}$:

q/v — погонная энергия; q — количество теплоты; v — длина сварного шва

значительному росту зерен, вызывающему резкое снижение пластичности. Следовательно, чрезмерно высокий подогрев может вызвать заметное ухудшение свойств (особенно ударной вязкости) металла ЗТВ на участке высокого отпуска. Для восстановления свойств околошовной зоны необходима последующая термическая обработка, причем время до ее проведения строго регламентируется.

Таким образом, при установлении режима сварки закаливающих сталей требуется рассчитать его параметры по условиям получения швов заданных геометрических размеров и формы, действительную скорость охлаждения $w_{\text{охл}}$ металла ЗТВ (в зависимости от условий проведения сварки) и результаты расчета сравнить с

Таблица 1.10. Допустимые скорости охлаждения $w_{\text{охл}}$ металла ЗТВ для закаливающихся сталей

Марка стали	$w_{\text{охл}}$, °C/с, до температуры 500 °C	Марка стали	$w_{\text{охл}}$, °C/с, до температуры 500 °C
35ХГСА	2,5... 6,0	25ХН2	2,0... 3,7
40Х	2,5... 3,7	25Н3	0,8... 11,0
45ХМА	< 0,7	30ХМ	< 8,0
30Г	3,0... 7,0	35ХВФА	1,0... 5,0

данными о допустимых скоростях охлаждения для данной стали. Если действительная скорость при сварке на принятом режиме окажется выше верхнего предела допустимых скоростей (см. табл. 1.10), то необходимо рассчитать температуру предварительного подогрева или применить некоторые технологические приемы заполнения разделки кромок (двухдуговая сварка раздвинутыми дугами, каскадом, горкой и др.).

В случае если сталь склонна к значительному росту зерна, а действительная скорость охлаждения металла ЗТВ по расчету оказалась меньше нижнего предела допустимых скоростей, следует увеличить число слоев в шве и сварить их длинными швами. При выборе новых режимов также находят действительные скорости охлаждения.

При определении марки стали на стадии проектирования сварной конструкции иногда требуется ориентировочно оценить необходимость подогрева перед сваркой. Для приближенной оценки влияния термического цикла сварки на закаливаемость околошовной зоны и определения того, требуется ли снижение скорости охлаждения за счет предварительного подогрева, пользуются так называемым эквивалентом углерода C_3 . Если при подсчете окажется, что $C_3 < 0,45\%$, значит, данная сталь может свариваться без предварительного подогрева; если $C_3 > 0,45\%$, необходим предварительный подогрев, тем более высокий, чем выше значение указанного эквивалента.

При сварке металла относительно небольшой толщины (до 6... 8 мм) и сварных узлов небольшой жесткости предельное значение C_3 , при котором не требуется предварительный подогрев, может быть повышено до 0,55 %.

Оценка закаливаемости стали в условиях сварки по эквиваленту углерода — приближенная, так как не учитывается ряд важных факторов, таких как толщина свариваемой стали, тип соединения, режим сварки и исходное структурное состояние.

Температуру подогрева металла перед сваркой можно оценить по методике, учитывающей химический состав свариваемой стали

и ее толщину. Согласно этой методике полный эквивалент углерода C_3 определяют по формуле

$$C_3 = C_x + C_p,$$

где C_x — химический эквивалент углерода; C_p — размерный эквивалент углерода:

$$C_x = C + Mn/9 + Cr/9 + Ni/18 + Mo/12; C_p = 0,005SC_x,$$

где S — толщина свариваемой стали, мм.

Тогда полный эквивалент углерода

$$C_3 = C_x(1 + 0,005S).$$

Определив полный эквивалент углерода, необходимую температуру предварительного подогрева находят по формуле

$$T_{II} = 350(C_3 - 0,2S)^{0,5}.$$

Полученная температура предварительного подогрева должна быть проверена и откорректирована путем определения действительных скоростей охлаждения при сварке на принятых режимах и сопоставления результатов расчета с рекомендуемым для данной марки стали диапазоном допустимых скоростей охлаждения.

К сталям, закаливающимся в условиях сварки, относятся также низко- и среднелегированные теплоустойчивые стали, которые длительное время сохраняют высокие прочностные свойства при работе в условиях повышенных температур (450...580 °С), оцениваемые пределом текучести и длительной прочностью.

Теплоустойчивость сталям придает введение в качестве легирующего элемента молибдена или ниобия в сочетании с хромом и ванадием. К таким сталям относятся, например, 20ХМ, 15Х1МФ, 15Х2МФБ, 20Х2МА. Поскольку теплоустойчивые стали склонны к закалке в зоне, прилегающей к шву, то они свариваются с предварительным и последующим подогревом. В зависимости от состава стали и ее толщины температуру подогрева выбирают в пределах 150...400 °С.

Для получения сварных соединений, обладающих высокой работоспособностью, после сварки проводят термическую обработку для восстановления свойств в ЗТВ.

1.5. НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫЕ БЕЙНИТНО-МАРТЕНСИТНЫЕ СТАЛИ

Состав и свойства. Высокопрочные стали, предназначенные для сварных конструкций, должны обладать хорошей пластичностью, высокой сопротивляемостью хрупкому разрушению и удовлетворительной свариваемостью. Необходимый комплекс технологиче-

ских свойств сталей с условным пределом текучести $\sigma_{0,2} = 580 \dots 780$ МПа обеспечивается структурой, которая формируется в процессе мартенситного или бейнитного превращения и определяется легированием и термической обработкой.

Основные марки низкоуглеродистых бейнитно-мартенситных сталей: 13ХГМРБ, 14Х2ГМ, 14ХГН2МДАФБ, 12Г2СМФАЮ, 12ХГН2МФБДАЮ, 12ХГН3МАФД-СШ и др.

Оптимальные механические свойства и высокую сопротивляемость хрупкому разрушению при отрицательной температуре они приобретают после закалки или нормализации и последующего высокого отпуска.

Механические свойства этих сталей приведены в табл. 1.11.

Хорошее сочетание свойств имеют стали, содержащие 0,4... 0,6 % Мо и 0,002... 0,006 % В с добавкой других легирующих элемен-

Таблица 1.11. Механические свойства низкоуглеродистых бейнитно-мартенситных сталей

Марка стали	Толщина, мм	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	КСУ, МДж/м ² , не менее, при температуре	
					-40 °С	-70 °С
13ХГМРБ	10...50	590	690	14	0,39	0,29
14Х2ГМРБ	10...50	588	686	14	0,39	—
14Х2ГМРЛ	> 40	588	686	14	0,34	—
14Х2ГМ	3...30	588	686	16	0,39	—
12Г2СМФАЮ	10...32	588	686	14	0,34	—
12ГН2МФАЮ	16...40	588	686	14	—	0,29
12ХГН2МФБАЮ	16...40	736	834	12	—	0,29
12ХГН2МФБДАЮ	20...40	785	883	15	—	0,29
12ХГН2МФДРА	4...20	980	1 078	10	0,29	—
14ХГН2МДАФБ	3...50	685	780	16	0,39	—
14ХГ2САФД	16...40	588	686	14	0,39	—
12ГН3МФАЮДР-СШ	4...40	685	780	16	0,78	0,59
12ХГН3МАФД-СШ	3...50	980	1 080	14	—	0,59
14ХГНМДАФБРТ	6...20	785	980	12	0,39	0,29

Примечание. См. примеч. 1 к табл. 1.2, примеч. 2 к табл. 1.4.

тов, что обеспечивает получение стабильной бейнитной или мартенситной структуры. Кроме того, применяются безникелевые стали, содержащие 0,15... 0,3 % Mo и 0,002... 0,006 % В (12Г2СМФАЮ), которые уступают сталям типа 14Х2ГМРБ по хладостойкости, а также стали с небольшим количеством азота (0,02... 0,03 %) и нитридообразующих элементов — алюминия, ванадия, ниобия. Наличие мелкодисперсных нитридов в стали способствует уменьшению их склонности к росту аустенитного зерна при сварке.

Свариваемость. Основными показателями свариваемости низкоуглеродистых бейнитно-мартенситных сталей являются сопротивляемость сварных соединений появлению холодных трещин и хрупкому разрушению и механические свойства ЗТВ, которые прежде всего связаны с фазовыми превращениями и структурными изменениями, происходящими в стали при сварке. Структурные изменения в стали при воздействии термического сварочного цикла оценивают по термическим диаграммам непрерывного распада аустенита.

Например, превращение аустенита стали 12ГН2МФАЮ (рис. 1.10) при скорости охлаждения $w_{\text{охл}} = 75 \dots 1,6 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$ в интервале 600... 500 °С происходит в мартенситной и бейнитной областях, ферритное и перлитное превращения отсутствуют. При $w_{\text{охл}} = 75 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$ мартенситное превращение начинается при 450 °С и заканчивается при 270 °С, твердость мартенсита равна 380 НВ. С уменьшением скорости охлаждения количество мартенситной составляющей уменьшается.

При $w_{\text{охл}} = 1,6 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{с}$ происходит полностью бейнитное превращение в интервале температур 635... 465 °С; твердость 205 НВ.

Низкоуглеродистые бейнитно-мартенситные стали имеют ограниченное содержание углерода, никеля, кремния, серы и фосфора. Поэтому при соблюдении режимов сварки и правильном применении присадочных материалов горячие трещины отсутствуют.

Наиболее распространенным и опасным дефектом сварных соединений сталей являются холодные трещины в зоне термического влияния и металле шва, возникающие в закаленной структуре под влиянием водорода и сварочных напряжений.

Высокая сопротивляемость сварных соединений низкоуглеродистых легированных сталей образованию трещин обеспечивается в случае, когда содержание диффузионного водорода в наплавленном металле не превышает 3,5... 4,0 мл на 100 г. Более высокая концентрация водорода приводит к снижению сопротивляемости соединений образованию холодных трещин. Для предотвращения их образования в этих сталях необходимы ограничения допускаемых скоростей охлаждения.

Критериями при определении диапазона режимов сварки и температур предварительного подогрева служат допустимые макси-

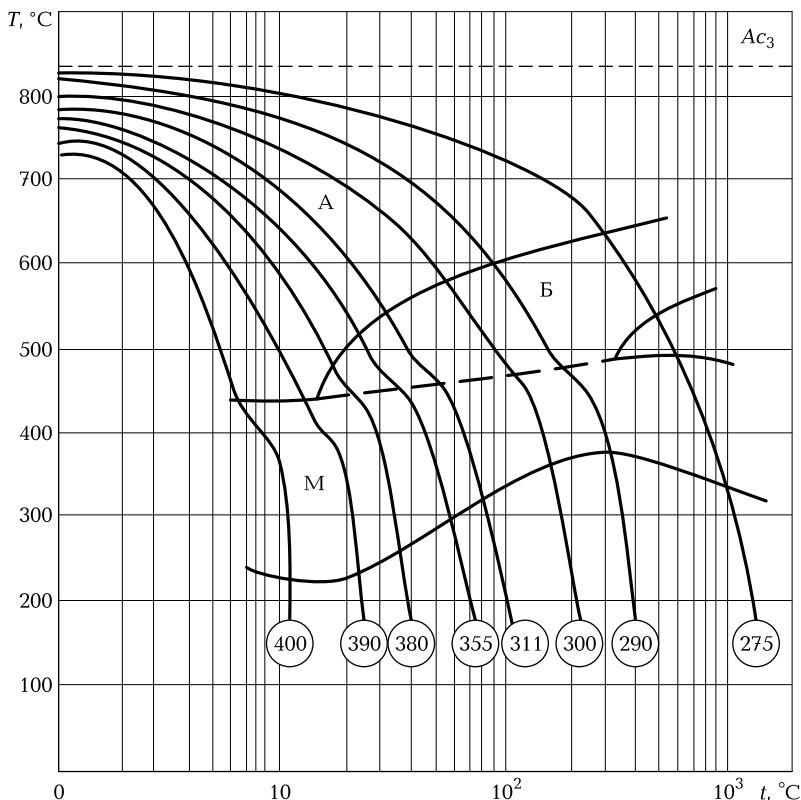


Рис. 1.10. Термическая диаграмма распада аустенита стали 12ГН2МФАЮ:

А — аустенит; Б — бейнит; М — мартенсит; A_{c3} — критическая точка; цифры в кружках соответствуют твердости HV

мальная и минимальная скорости охлаждения металла околошовной зоны. Максимально допустимые скорости охлаждения сталей принимаются таким образом, чтобы предотвратить образование холодных трещин в металле околошовной зоны. Величину этой скорости охлаждения определяют экспериментально — по результатам испытаний технологических проб или же расчетным путем.

Для предотвращения неблагоприятного изменения структуры и снижения ударной вязкости металла зоны перегрева необходимо ограничивать минимальную скорость охлаждения. Чрезмерно высокие погонные энергии сварки приводят к образованию у линии сплавления крупнозернистых структур с низкими показателями ударной вязкости. Кроме того, длительное пребывание отдельных зон основного металла при температурах, превышающих темпера-

туру отпуска стали, может способствовать разупрочнению металла. При сварке бейнитно-мартенситных сталей скорость охлаждения целесообразно регулировать, изменяя как погонную энергию, так и температуру предварительного или последующего подогрева соединений. Подогрев замедляет скорость остывания при температуре ниже 300 °С и способствует более полному удалению водорода из наплавленного металла. При этом возрастает стойкость соединений против образования холодных трещин. Увеличение погонной энергии продлевает пребывание металла в области высоких температур, что ухудшает его механические свойства. Поэтому наилучшее сочетание механических свойств соединений и их стойкости против трещин достигается при использовании оптимальных режимов сварки и температур предварительного и последующего подогрева.

Для соединений толщиной менее 20 мм скорость охлаждения металла околошовной зоны следует регулировать в основном изменением погонной энергии сварки, при толщине свыше 20 мм — погонной энергии сварки и температуры предварительного и последующего подогрева в интервале 50... 150 °С.

Стойкость сварных соединений против образования холодных трещин может быть также повышена применением технологии сварки с «мягкими прослойками», при которой первые слои многослойного шва выполняют менее прочным и более пластичным металлом по сравнению с последующими слоями. В отдельных случаях («жесткие» соединения большой толщины) малопрочные пластичные швы в один-два слоя выполняют и в процессе заполнения разделки кромок.

1.6. ЖАРОПРОЧНЫЕ ПЕРЛИТНЫЕ СТАЛИ

Состав и свойства. К жаропрочным перлитным сталям относятся низколегированные хромомолибденовые стали 12МХ, 12ХМ, 15ХМ, предназначенные для работы при 450... 550 °С, и хромомолибденованадиевые: 12Х1МФ, 20ХМФЛ, 15Х1М1ФЛ, предназначенные для работы при 550... 600 °С.

Жаропрочные перлитные стали используют в энергетическом, химическом и нефтехимическом машиностроении. Литейные стали 20ХМФЛ и 15Х1М1ФЛ применяют для отливки корпусов турбин и запорной арматуры, а деформируемые стали 12МХ, 15ХМ, 12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 12Х2МФСР — для изготовления корпусов аппаратов, паропроводов, технологических трубопроводов и поверхностей нагрева котлов.

В соответствии с условиями длительной работы под напряжением при высоких температурах стали должны обладать сопротивле-

Таблица 1.12. Предел длительной прочности жаропрочных сталей при различных температурах

Марка стали	Предел длительной прочности, МПа, при температуре, °С					
	450	500	550	565	580	600
15ХМ	265	137	63	—	—	—
12Х1МФ	—	157	88	78	59	—
15Х1М1Ф	—	186	108	88	68	—
12Х2МФСР	—	—	—	—	88	68

нием ползучести, длительной прочностью, стабильностью свойств во времени и жаростойкостью. Эти свойства с учетом требуемой технологичности сталей при сварке обеспечивают введением 0,5... 2,0 % Cr; 0,2... 1,0 % Mo; 0,1... 0,3 % V, а также в некоторых случаях — небольших добавок редкоземельных элементов и бора.

Легирование хромом повышает жаростойкость сталей при температуре выше 450 °С, а совместно с молибденом — длительную прочность и сопротивление ползучести за счет образований упрочняющей металл фазы Fe₂Mo. Ванадий совместно с углеродом обеспечивает упрочнение стали дисперсными карбидами (табл. 1.12).

Оптимальное сочетание механических свойств изделий из перлитных жаропрочных сталей достигается при нормализации (или закалке) с последующим высокотемпературным отпуском. При этом образуется мелкодисперсная ферритокарбидная смесь, а в хромомолибденованадиевых сталях, особенно при закалке, появляется также и бейнитная структура.

Свариваемость. Существующая технология сварки и сварочные материалы обеспечивают необходимую стойкость металла шва против образования горячих трещин и требуемые характеристики сварного соединения, но не исключают склонности сварных соединений к образованию холодных трещин и разупрочнение металла в ЗТВ сварки.

Холодные трещины могут возникать в процессе сварки или непосредственно после ее окончания в результате образования троостита и мартенсита в участках околосшовной зоны, нагретых выше температуры А_{с3}, под влиянием водорода и действием напряжений, вызванных неравномерным нагревом и структурными превращениями.

В связи с тем, что растворимость диффузионно-подвижного водорода при нормальной температуре в низколегированных сталях мала, давление его в несплошностях жаропрочной перлитной стали может достигать 0,0981 · 10⁶ МПа, что приводит к образованию ми-

кротрещин в охрупченных участках сварного соединения. В связи с этим для сварки рекомендуются низководородные сварочные материалы (электроды с основным покрытием, осушенные защитные газы, прокаленные флюсы).

Влияние напряжений на образование трещин зависит от жесткости сварной конструкции, которая связана с толщиной свариваемых элементов. Это необходимо учитывать при выборе методов предотвращения образования холодных трещин.

Одним из наиболее надежных средств предотвращения возникновения холодных трещин является сопутствующий местный или общий подогрев изделия. Подогрев уменьшает разницу температур металла в зоне сварки, вследствие чего пики напряжений в околошовных участках металла сглаживаются и превращения аустенита в мартенсит не происходит. Повышение температуры свариваемого металла способствует увеличению диффузионной подвижности водорода и удалению его из сварного соединения, а также возрастанию пластичности и способности к деформации металла. Однако при сварке теплоустойчивых сталей необходимо ограничивать не только нижний, но и верхний предел температур подогрева, так как при распаде аустенита в высокотемпературной области образуется грубая ферритно-перлитная структура с пониженным пределом длительной прочности и низкой ударной вязкостью.

В некоторых случаях требуется выдержка сварных соединений после окончания сварки при 150...200 °С в течение нескольких часов для завершения превращения остаточного аустенита и эвакуации водорода.

Термическая обработка сталей в состоянии поставки (нормализация или закалка с последующим отпуском) осложняет сварку в связи с возникновением в зонах термического влияния участков разупрочнения, нагретых до температур A_{c3} или температуры отпуска стали. Разупрочнение металла околошовной зоны можно устранить нормализацией с последующим отпуском. Однако местная высокотемпературная термическая обработка сварных соединений приводит к разупрочнению близлежащих участков металла, а термическая обработка всей сварной конструкции часто затруднена.

Изменение свойств в зоне сплавления при эксплуатации. При температурах эксплуатации 450...600 °С возможно развитие диффузионных процессов между основным металлом и металлом шва. Углерод, который является одним из наиболее диффузионно-подвижных элементов, может мигрировать даже при небольшом различии в легировании карбидообразующими элементами. Образование в процессе эксплуатации обезуглероженной (ферритной) прослойки по одну сторону линии сплавления и карбидов по другую снижает предел длительной прочности и пластичность сварно-

го соединения и, как следствие, приводит к локальному (по зоне сплавления) разрушению.

В связи с этим сварочные материалы, предназначенные для жаропрочных перлитных сталей, должны обеспечивать химический состав металла шва, близкий к химическому составу основного металла. Если невозможны подогрев и термическая обработка (отпуск) сварных соединений, используют сварочные материалы, обеспечивающие получение металла шва на никелевой основе, поскольку диффузионная подвижность элементов в аустените при 450...600 °С значительно меньше, чем в сталях перлитного класса.

1.7. ВЫСОКОХРОМИСТЫЕ МАРТЕНСИТНЫЕ, МАРТЕНСИТНО-ФЕРРИТНЫЕ И ФЕРРИТНЫЕ СТАЛИ

1.7.1. Состав и свойства

Хром от точки плавления до низких температур имеет решетку объемно-центрированного куба, изоморфную α -железу. В связи с этим легирование железа хромом сужает область γ -растворов (рис. 1.11).

Хром придает сплавам с железом ряд специфических свойств. Так, при наличии в растворе 12% Cr по массе возникающая при

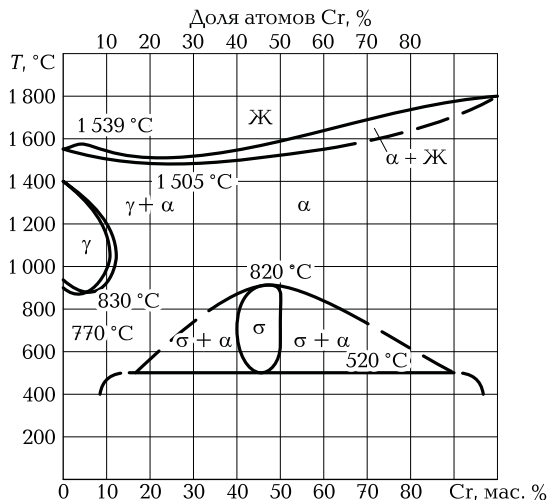


Рис. 1.11. Структурная диаграмма Fe—Cr:

Ж — жидкое состояние; α — α -железо; γ — γ -железо; σ — σ -железо

окислении поверхностная пленка приводит к пассивации этой поверхности. Сталь становится коррозионно-стойкой при относительно невысокой температуре. Для обеспечения окалиностойкости при более высоких температурах (800...1050 °С) концентрация хрома в сталях должна быть увеличена (примерно до 30 мас. %).

Хром по отношению к кислороду обладает несколько большим сродством, чем железо, и образует оксид Cr_2O_3 с высокой температурой плавления. Хром также обладает большим сродством к углероду, чем железо, является карбидообразующим элементом, может входить в состав карбидов типа цементит $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ и образует карбиды типов Cr_7C_3 и Cr_{23}C_6 (иногда с частичной заменой атомов хрома другими, в частности атомами железа, например, $(\text{Fe}, \text{Cr})_{23}\text{C}_6$). Карбиды хрома термически более стойки по сравнению с карбидом железа, они растворяются медленнее и при более высоких температурах. В связи с этим для гомогенизации твердых растворов $\text{Fe}-\text{Cr}-\text{C}$ требуется более высокая температура и более длительная выдержка, чем для углеродистых сталей (до 900 °С).

Температурная область существования γ -растворов в хромистых сталях значительно изменяется в зависимости от содержания в них хрома и углерода и в меньшей степени — от содержания других элементов — никеля, молибдена.

При комнатной температуре существуют мартенситные, мартенситно-ферритные и ферритные хромистые стали. Влияние хрома на положение точек фазовых превращений для наиболее распространенных составов высокохромистых сталей показано на рис. 1.12.

Средне- и высоколегированные хромистые стали, имеющие область аустенита при высоких температурах, после охлаждения даже с умеренными скоростями при комнатной температуре приобретают мартенситную структуру.

При повышении концентрации хрома (больше 16 % при 0,06 % С) сталь в процессе нагрева не переходит целиком в аустенит, а будет иметь некоторое количество непревращенной ферритной фазы.

Последующее ее охлаждение приведет к получению смешанной мартенситно-ферритной структуры. При этом повышение содержания хрома в стали (при неизменном содержании углерода) способствует относительному увеличению ферритной составляющей в структуре.

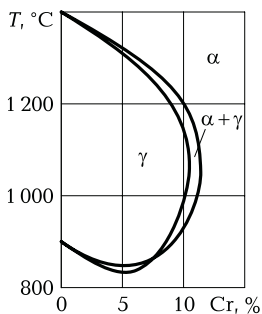


Рис. 1.12. Влияние хрома на положение точек фазовых превращений в сплавах с железом:

α — α -железо; γ — γ -железо

Дальнейшее повышение содержания хрома при малой концентрации углерода приведет к тому, что сталь при любых температурах сохранит ферритную структуру. Такая структура получается и при любой скорости охлаждения. Различие может быть только в относительном количестве выпавших карбидов.

Таким образом, при 0,05...0,06 % С стали с содержанием до 12...13 % Cr относятся к мартенситному классу; при 13...16 % Cr — к мартенситно-ферритному, а при Cr > 16 % — к ферритному. При увеличении концентрации углерода граничные значения области превращения смещаются соответственно в сторону больших концентраций хрома.

1.7.2. Мартенситные хромистые стали

Состав и свойства. В большинстве случаев высокохромистые мартенситные стали имеют повышенное содержание углерода, некоторые из них дополнительно легированы никелем (табл. 1.13). Углерод, никель и другие аустенитообразующие элементы расширяют область и способствуют практически полному превращению γ -железа в α -железо и мартенсит в процессе охлаждения. Применение для закаленной стали отжига при температурах ниже A_{c3} способствует отпуску структур закалки и возможности получения одновременно высоких значений прочности, пластичности и ударной вязкости.

Ферритообразующие элементы (Mo, W, V, Nb) вводят для повышения жаропрочности сталей. Если обычные 12%-ные хромистые стали имеют достаточно высокие механические свойства при температурах до 500 °С, то сложнолегированные обладают высокими характеристиками до 650 °С и используются для изготовления рабочих и направляющих лопаток, дисков паровых турбин и газотурбинных установок различного назначения.

Железо образует с хромом непрерывный ряд твердых растворов (см. рис. 1.11) с объемно-центрированной кубической решеткой. У сплавов с низким содержанием хрома имеется замкнутая область γ -твердых растворов. На диаграмме Fe—Cr область γ ограничена справа двумя линиями, замыкающими гетерогенный участок $\alpha + \gamma$. При концентрации до 8 % хром способствует устойчивости аустенита, расширению его температурной области (см. рис. 1.12) и снижает критические скорости охлаждения. В результате этого при низком содержании углерода легирование до 12 % хромом приводит к формированию в стали однофазной мартенситной структуры, образующейся в превращении $\gamma \rightarrow \alpha(M)$ даже при медленном охлаждении от 800 °С со скоростью менее 1 °С/с.

При содержании хрома более 12 % в процессе нагрева у сплавов невозможно полное превращение $\alpha \rightarrow \gamma$. В соответствии с образую-

Таблица 1.13. Химический состав высокохромистых мартенситных сталей

Марка стали	Массовая доля компонентов, %				
	C	Si	Mn	S	P
15X1ШФ	0,12...0,19	< 0,5	< 0,7	< 0,025	< 0,030
15X12ВНМФ	0,12...0,18	< 0,4	0,5...0,9	< 0,025	< 0,030
18X11МНФБ	0,15...0,21	< 0,6	0,6...1,0	< 0,025	< 0,030
13X11Н2В2МФ	0,10...0,16	< 0,6	< 0,6	< 0,025	< 0,030
12X11В2МФ	0,10...0,15	< 0,50	0,50...0,80	< 0,025	< 0,025
10X12НД	0,08...0,10	< 0,30	< 0,60	< 0,025	< 0,025
06X12НЗД	< 0,06	< 0,30	< 0,60	< 0,025	< 0,025

Продолжение табл. 1.13

Марка стали	Массовая доля компонентов, %				
	Cr	Ni	Mo	V	Прочие
15X1ШФ	10,0...11,5	—	0,6...0,8	0,25... 0,40	—
15X12ВНМФ	11,0...13,0	0,4... 0,8	0,5...0,7	0,15... 0,30	0,7... 1,1 W
18X11МНФБ	10,0...11,5	0,5... 1,0	0,8...1,1	0,20... 0,40	0,20... 0,45 Nb
13X11Н2В2МФ	10,5...12,0	1,50... 1,80	0,35...0,50	0,18... 0,30	1,60 W
12X11В2МФ	10,0...12,0	0,60	0,60...0,90	0,15... 0,30	1,70 W
10X12НД	12,0...13,5	2,8... 3,2	0,8...1,1	—	0,8... 1,0 Cu
06X12НЗД	12,0...13,5	2,80... 3,20	—	—	0,80... 1,10 Cu

щейся после охлаждения структурой такие сплавы относят к мартенситно-ферритному или ферритному классу.

Механические свойства высокохромистых мартенситных сталей и их сварных соединений определяются фактическим химиче-

Таблица 1.14. Механические свойства высокохромистых мартенситных сталей

Марка стали	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %	КСУ, МДж/м ²
15X11МФ	490	690	15	55	0,6
15X12ВНМФ	590	740	15	45	0,6
18X11МНФБ	590...735	740	15	50	0,6
13X11Н2В2МФ	735	880	15	55	0,9
12X11В2МФ	392	588	18	—	—
10X12НД	500	650	14	30	0,3
06X12НЗД	500...700	700	14	30	0,5

Примечание. См. примеч. 1 к табл. 1.2, примеч. 2 к табл. 1.4, примеч. 2 к табл. 1.6.

ским составом и режимом термической обработки, с помощью которой можно регулировать как свойства самой мартенситной матрицы, так и конечный фазовый состав и структуру сталей (табл. 1.14).

Свариваемость. Повышенная склонность мартенситных сталей к хрупкому разрушению в состоянии закалки усложняет технологию их сварки. При содержании углерода более 0,10 % мартенситные стали склонны к образованию холодных трещин при сварке из-за высокой степени тетрагональности кристаллической решетки мартенсита. Снижение содержания углерода позволяет повысить вязкость мартенсита, однако образующийся при этом структурно-свободный δ -феррит, в свою очередь, сообщает им высокую хрупкость. Поэтому в сварных соединениях мартенситных сталей трещины могут наблюдаться в процессе непрерывного охлаждения при температурах ниже температуры начала мартенситного превращения M_n (для высокохромистых сталей не более 360 °С), а кроме того, в процессе выдержки при нормальной температуре (замедленное разрушение). С увеличением содержания углерода значения M_n и M_k (температура окончания мартенситного превращения, обычно 240 °С) еще более понижаются, что приводит к возрастанию твердости мартенсита и его хрупкости. Учитывая это, а также необходимость обеспечения сварным соединениям высокой пластичности и ударной вязкости содержание углерода в хромистых мартенситных сталях ограничивают 0,20 %.

Для предотвращения образования холодных трещин при сварке 11 ... 12%-ных хромистых сталей применяют предварительный и сопутствующий подогрев до 200... 450 °С. Температура подогрева тем выше, чем больше склонность стали к закалке. В то же время темпе-

ратура подогрева не должна быть чрезмерно высокой, так как это может привести к отпускной хрупкости вследствие снижения скорости охлаждения металла в околошовной зоне в интервале температур карбидообразования. Кроме того, высокий подогрев, как и сварка с большой погонной энергией, обеспечивает длительный перегрев околошовного металла, вызывающий рост зерна, сегрегацию примесей на границах зерен и, как следствие, снижение пластичности и вязкости сварных соединений.

Лучшие свойства сварных соединений достигаются в случае предварительного подогрева в интервале M_n — $M_{к1}$, а также когда после сварки производится подстуживание до $M_{к1}$, но не ниже 100 °С.

Низкоуглеродистые хромистые стали, дополнительно легированные никелем, образуют при закалке мартенсит, отличающийся вследствие низкого содержания углерода высокой пластичностью и вязкостью, не склонный к образованию холодных трещин при сварке. Однако чувствительность металла швов к водородной хрупкости вызывает при их сварке необходимость предварительного и сопутствующего подогрева до 100...200 °С. Кроме того, улучшению свариваемости этих сталей способствует остаточный аустенит.

1.7.3. Мартенситно-ферритные стали

Состав и свойства. Хромистые стали, содержащие 13...14 % Cr, с частичным превращением $\gamma \rightarrow \alpha(M)$ относят к мартенситно-ферритным, при охлаждении которых полиморфные превращения соответствуют реакции перехода δ -феррита в смесь γ - и α -железа с последующим переходом в смесь α -железа, мартенсита и δ -феррита: $\delta \rightarrow \gamma + \alpha \rightarrow \alpha(M) + \delta$. Количество δ -феррита в сталях повышается с увеличением содержания хрома и снижением концентрации углерода. Введение углерода сдвигает границы существования области γ -твердых растворов в сторону более высокого содержания хрома. В случае достаточно низкой скорости охлаждения от температур, превышающих 600 °С, возможно образование ферритной составляющей структуры. При температурах ниже 400 °С при более быстром охлаждении наблюдается бездиффузионное превращение аустенита в мартенсит. Количество образовавшегося мартенсита в каждом из указанных температурных интервалов зависит главным образом от скорости охлаждения и содержания углерода в стали.

Несмотря на отрицательное влияние δ -феррита на пластичность и ударную вязкость, мартенситно-ферритные стали 08X13, 12X13, 20X13, 08X14МФ и других марок находят широкое применение при изготовлении химических аппаратов и энергетического оборудования (табл. 1.15). Наиболее часто в машиностроении используются стали марок 08X13 и 08X14МФ с пониженным содержанием углерода.

Таблица 1.15. Химический состав мартенситно-ферритных сталей

Марка стали	Массовая доля компонентов, %					
	C	Si	Mn	S	P	Cr
08X13	< 0,08	< 0,80	< 0,80	< 0,025	< 0,030	12,0... 14,0
12X13	0,09...0,15	< 0,80	< 0,80	< 0,025	< 0,030	12,0... 14,0
20X13	0,16...0,25	< 0,80	< 0,80	< 0,025	< 0,030	12,0... 14,0
08X14МФ*	0,03...0,12	0,20... 0,45	0,08... 1,2	< 0,025	< 0,035	12,0... 14,8
14X17Н2	0,11...0,17	< 0,08	< 0,08	< 0,025	< 0,030	16,0... 18,0

* Мо — 0,2...0,4 %; V — 0,15...0,30 %; Ni — 1,0...2,5 %.

Таблица 1.16. Механические свойства мартенситно-ферритных сталей

Марка стали	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCU, МДж/м ²
08X13	410	590	20	60	1,0
12X13	410	590	20	60	0,9
20X13	440	650	16	55	0,8
08X14МФ	300	450	22	—	—
14X17Н2	635	835	10	30	0,5

Примечание. См. примеч. 1 к табл. 1.2, примеч. 2 к табл. 1.4, примеч. 2 к табл. 1.6.

В связи с возможностью формирования структуры с большим количеством ферритной составляющей, приводящей к охрупчиванию, нормативными документами, как правило, не предусматриваются требования по величине ударной вязкости KCU. Лишь для отдельных видов проката сталей марок 08X13 и 12X13 регламентирована величина ударной вязкости (табл. 1.16).

Свариваемость. Термокинетическая диаграмма распада аустенита стали марки 08X13 с содержанием углерода менее 0,08 % имеет две области превращения: в интервале 600...930 °С, соответствующем образованию ферритно-карбидной структуры, и 120...420 °С — мартенситной (рис. 1.13). Количество превращенного аустенита в каждом из указанных температурных интервалов зависит главным образом от скорости охлаждения. Например, при охлаждении со средней скоростью 0,025 °С/с превращение аустенита происходит

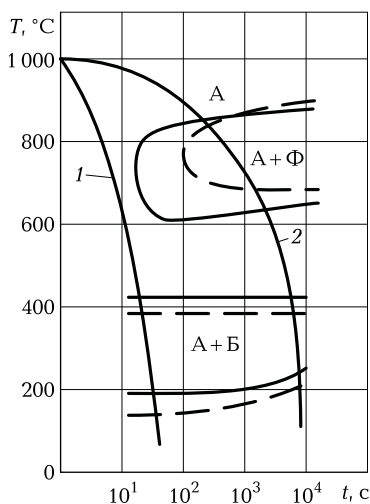


Рис. 1.13. Термокинетическая диаграмма распада аустенита при непрерывном охлаждении 13%-ной хромистой стали с разным содержанием углерода:

— — 0,08 % углерода; - - - 0,20 % углерода; А — аустенит; Ф — феррит; Б — бейнит; 1 — максимальная скорость охлаждения; 2 — минимальная скорость охлаждения

преимущественно в верхней области с образованием феррита и карбидов. Лишь 10 % аустенита в этом случае превращается в мартенсит в процессе охлаждения ниже 420 °С. Повышение скорости охлаждения стали до 10 °С/с способствует переохлаждению аустенита и полному его бездиффузионному превращению ниже температуры начала мартенситного превращения (420 °С). Изменения в структуре, обусловленные увеличением скорости охлаждения, влияют и на механические свойства сварных соединений. С возрастанием доли мартенсита наблюдается снижение ударной вязкости. Увеличение содержания углерода приводит к сдвигу в область более низких температур границ превращения γ -железа в смесь α -железа и сорбита и γ -железа в смесь α -железа и мартенсита: $\gamma \rightarrow \alpha(C)$ и $\gamma \rightarrow \alpha(M)$ сталей с содержанием углерода 0,10...0,25 %, в результате полное мартенситное превращение происходит при охлаждении со скоростью 1 °С/с.

В связи с высокой склонностью к подкалке в сварных соединениях этих сталей возможно образование холодных трещин. Склонность к их образованию при сварке зависит от характера распада аустенита в процессе охлаждения.

При формировании мартенситной структуры ударная вязкость сварных соединений 13%-ных хромистых сталей снижается до

0,05...0,10 МДж/м². Последующий отпуск при 650...700 °С приводит к распаду структуры закалки, выделению карбидов, в результате тетрагональность мартенсита уменьшается. После отпуска ударная вязкость возрастает до 1,0 МДж/м².

Образование значительного количества феррита в структуре околосшовного металла уменьшает склонность сварных соединений к холодным трещинам. Это характерно для 13%-ных хромистых сталей с содержанием углерода менее 0,1 %. Количество δ-феррита в структуре околосшовного металла зависит от температуры нагрева. В участках, нагреваемых до температур, близких к температуре солидуса, количество δ-феррита в структуре может стать подавляющим. Такая структура характерна для участка ЗТВ, примыкающего к линии сплавления. Ширина этого участка мало зависит от температуры подогрева, но возрастает с увеличением погонной энергии сварки. Для сталей 08X13 и 08X14МФ увеличение ширины участка с большим количеством δ-феррита отрицательно влияет на вязкость сварных соединений.

Сварка мартенситно-ферритных сталей производится в основном с предварительным и сопутствующим подогревом. Даже для стали марки 08X13 с наиболее низким содержанием углерода при сварке рекомендуется подогрев до 150...250 °С с последующей термической обработкой.

Дополнительное легирование стали 08X14МФ карбидообразующими элементами снижает эффективное содержание углерода. Тетрагональность мартенсита уменьшается, и сталь, легированная дополнительно молибденом и ванадием, может свариваться без подогрева.

1.7.4. Ферритные хромистые стали

Состав и свойства. При содержании хрома свыше 12 % стали, структура которых соответствует области диаграммы состояния Fe—Cr, относят к ферритным. Граница области γ-твердых растворов изменяется в зависимости от содержания углерода (рис. 1.14). Перемещение границы γ-области в сторону больших концентраций хрома при введении углерода связано с уменьшением количества растворенного хрома вследствие образования стабильных его карбидов. В связи с этим ферритные стали с обычным содержанием углерода легированы хромом не менее чем на 16 %.

По сопротивляемости коррозии ферритные стали типа 08X17T, 15X25T не уступают хромоникелевым аустенитным сталям и значительно превосходят их по стойкости к коррозионному растрескиванию. При дополнительном легировании алюминием и кремнием хромистые ферритные стали могут быть использованы для изго-

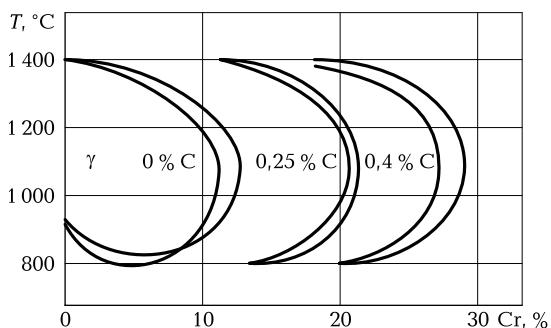


Рис. 1.14. Положение области γ на диаграмме состояния сплавов с разным содержанием углерода

товления оборудования, работающего в условиях окисления при температурах до 1 200 °С (табл. 1.17).

Ферритные стали с обычным содержанием углерода и азота не применяются вследствие хрупкого разрушения конструкций как в процессе изготовления, так и при транспортировке и эксплуатации. Высокая чувствительность к надрезу при нормальной температуре затрудняет их использование для изготовления оборудования, работающего в условиях ударных и знакопеременных нагрузок.

Повышение пластичности и вязкости хромистых ферритных сталей возможно при ограничении в их составе примесей внедрения (до 0,020 % в сумме) при выплавке в специальных вакуумных печах.

К хромистым ферритным сталям, произведенным в открытых печах, практически не предъявляют требований по ударной вязко-

Таблица 1.17. Химический состав хромистых ферритных сталей

Марка стали	Массовая доля компонентов, %			
	C	Si	Mn	S
08X17T	< 0,08	< 0,8	< 0,8	< 0,025
15X25T	< 0,15	< 1,0	< 0,8	< 0,025
08X23C2Ю	< 0,08	< 1,5... 1,8	0,4... 0,7	< 0,015

Продолжение табл. 1.17

Марка стали	Массовая доля компонентов, %			
	P	Cr	Ti	Прочие
08X17T	< 0,035	16,0... 18,0	0,5... 0,80	—
15X25T	< 0,035	24,0... 27,0	0,5... 0,90	—
08X23C2Ю	< 0,03	22,0... 24,0	—	1,1 ... 1,6 A1

сти, а оговаривают в основном минимально допустимые значения предела прочности при растяжении (370... 460 МПа) и пластичности (14... 18 %).

Свариваемость. Высокохромистые стали ферритного класса склонны к дополнительному охрупчиванию под воздействием нагрева. Ударная вязкость и пластичность металла в ЗТВ сварных соединений приближаются к нулю. У этих сталей не удается предотвратить интенсивный рост зерна при сварке плавлением. Наиболее крупные зерна образуются на участке перегрева, где температура достигает температуры солидуса $T_{\text{сол}}$. Охрупчивание околошовного участка распространяется на слой, непосредственно примыкающий к линии сплавления и нагретый выше 1 000 °С.

Охрупчивание ферритных сталей возможно также после выдержки в интервалах температур, способствующих образованию σ -фазы (550... 850 °С) и так называемой 475°-ной хрупкости (400... 550 °С). Ударная вязкость стали после кратковременного нагрева до 475 °С снижается до 0,3 против 0,9 МДж/м².

Хрупкость при 475 °С устраняется нагревом до 750... 760 °С, который практически полностью восстанавливает исходный уровень пластичности и вязкости стали. Более высокие температуры нагрева не эффективны, поскольку способствуют росту ферритного зерна и появлению хладноломкости при нормальной температуре вследствие формирования грубозернистой структуры. Во избежание образования трещин сварку, правку и все операции, связанные с ударными нагрузками, проводят с подогревом до температур 150... 200 °С.

Однако подогрев при сварке отрицательно влияет на пластичность металла с ферритной структурой, так как уменьшает скорость охлаждения и увеличивает продолжительность выдержки в интервале температур, близких к 475 °С. Ускоренное охлаждение (100 °С/с) повышает пластичность стали со структурой перегрева.

1.8. ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫЕ АУСТЕНИТНЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ

Состав и свойства. Высоколегированные аустенитные стали имеют повышенное содержание основных легирующих элементов — хрома и никеля (обычно не ниже 16 и 7 % соответственно), придающих им соответствующую структуру и необходимые свойства (табл. 1.18). Для сокращения высоколегированные стали обозначают в соответствии с содержанием основных легирующих элементов цифрами, например 18—8, 25—20 и др. Первая цифра обозначает содержание хрома, вторая — никеля.

Никель — дефицитный и дорогой легирующий элемент, поэтому в тех случаях, когда условия работы конструкции позволяют, исполь-

зуют стали с пониженным его содержанием или безникелевые хромистые стали. В сплавах на железоникелевой основе содержание никеля еще выше, чем в хромоникелевых сталях. В никелевых сплавах никель служит основой, а железо — легирующей присадкой (см. табл. 1.18). Эти сплавы находят применение в ответственных конструкциях, работающих в сложных и специфических условиях.

Высоколегированные стали и сплавы по сравнению с менее легированными обладают высокой хладостойкостью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью и жаростойкостью. Эти важнейшие материалы для химического, нефтяного, энергетического машиностроения и ряда других отраслей промышленности используют при изготовлении изделий, работающих в широком диапазоне температур: от отрицательных до положительных. Несмотря на общие высокие свойства высоколегированных сталей, соответствующий подбор состава легирования определяет их основное назначение. В соответствии с этим их подразделяют на три группы: коррозионно-стойкие, жаропрочные и жаростойкие (окалиностойкие). Высокие механические свойства при отрицательных температурах позволяют применять высоколегированные стали и сплавы и как хладостойкие.

Коррозионно-стойкие стали при соответствующем легировании и термообработке обладают высокой коррозионной стойкостью при комнатных и повышенных до 800 °С температурах как в атмосферной и газовой среде, так и в чистых и водных растворах кислот и щелочей, жидкометаллических средах. Характерное отличие этих сталей — пониженное содержание углерода (обычно не превышает 12 %), влияющее на их стойкость к межкристаллитной коррозии (МКК). Благодаря этим свойствам коррозионно-стойкие стали используют при изготовлении трубопроводов и аппаратов для химической и нефтяной промышленности.

Жаропрочные стали и сплавы при повышенных температурах обладают высокими механическими свойствами и способностью сохранять их в течение длительного времени. Для придания этих свойств стали и сплавы обычно легируют элементами-упрочнителями — молибденом и вольфрамом (до 7 % каждого). Важной легирующей присадкой, вводимой в некоторые стали и сплавы, является бор. В ряде случаев к этим металлам предъявляется требование и высокой жаростойкости. Одна из основных областей применения жаропрочных сталей — энергетическое машиностроение (трубопроводы, детали и корпуса газовых и паровых турбин и т. д.), где рабочие температуры достигают 750 °С и выше.

Жаростойкие стали и сплавы обладают стойкостью против химического разрушения поверхности в газовых средах при температурах до 1 100... 1 150 °С. Главным образом их используют для слабонагруженных деталей (нагревательные элементы, печная арматура,

Таблица 1.18. Химический состав высоколегированных аустенитных и аустенитно-ферритных сталей и сплавов

Марка стали	Массовая доля компонентов, %						Основные свойства стали		
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Прочие	Коррозионная стойкость	Жаро- стойкость	Жаро- прочность
<i>Высоколегированные стали</i>									
08X18H10T	≤ 0,08	≤ 0,80	1,0 ... 2,0	17,0 ... 19,0	9,0 ... 11,0	—	+	-	-
12X18H10T	≤ 0,12	≤ 0,80	1,0 ... 2,0	17,0 ... 19,0	9,0 ... 11,0	Ti ≥ 0,7	+	-	-
08X18H12T	≤ 0,08	≤ 0,80	1,0 ... 2,0	17,0 ... 19,0	11,0 ... 13,0	Ti ≥ 0,6	+	-	-
10X17H13M2T	≤ 0,10	≤ 0,80	1,0 ... 2,0	16,0 ... 18,0	12,0 ... 14,0	1,8 ... 2,5 Mn; 0,3 ... 0,6 Ti	+	-	-
08X18H12Б	≤ 0,08	≤ 0,80	1,0 ... 2,0	17,0 ... 19,0	11,0 ... 13,0	Nb ≥ 1,2	+	-	-
10X14Г14Н4Т	≤ 0,10	≤ 0,80	13,0 ... 15,0	13,0 ... 15,0	2,5 ... 3,5	Ti ≥ 0,6	+	-	-
08X22H6T	≤ 0,08	≤ 0,80	≤ 0,80	20,0 ... 22,0	4,8 ... 5,8	0,3 ... 0,6 Ti	+	-	-
08X21H6M2T	≤ 0,08	≤ 0,80	≤ 0,80	20,0 ... 22,0	5,5 ... 6,5	0,3 ... 0,6 Ti; 1,8 ... 2,5 Mo	+	-	-
09X17H7Ю	≤ 0,08	≤ 0,80	≤ 0,80	16,0 ... 18,0	6,5 ... 7,5	0,8 ... 1,3 Al	+	-	-

Марка стали	Массовая доля компонентов, %						Основные свойства стали		
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Прочие	Коррозионная стойкость	Жаро-стойкость	Жаро-прочность
09X14H19B2BP	0,07...0,12	≤ 0,60	1,0...2,0	13,0...15,0	18,0...20,0	2,0...2,75 W; 0,9...1,3 Nb; B ≤ 0,005; Ce ≤ 0,020	+	-	+
08X16H13M2B	0,06...0,12	≤ 0,60	≤ 1,0	15,0...17,0	12,5...14,5	2,0...2,5 Mo; 0,9...1,3 Nb	+	-	-
20X23H18	≤ 0,20	≤ 1,0	≤ 2,0	22,0...25,0	17,0...20,0	—	-	+	-
20X25H20C2	≤ 0,20	2...3	≤ 1,5	24,0...27,0	18,0...21,0	—	-	+	-
<i>Сплавы на железоникелевой основе</i>									
ХН38ВТ	0,06...0,12	≤ 0,80	≤ 0,70	20,0...23,0	35,0...39,0	0,7...1,2 Ti; Al ≤ 0,15; 2,8...3,5 W	-	+	+
06ХН28МДТ	≤ 0,60	≤ 0,80	≤ 0,80	22,0...25,0	26,0...29,0	0,4...0,7 Ti; 2,5...3,0 Mo; 2,5...3,5 Cu	+		+

<i>Сплавы на никелевой основе</i>									
ХН78Т	≤ 0,12	≤ 0,80	≤ 0,70	19,0... 22,0	Ост.	0,15... 0,35 Ti; Al ≤ 0,15; Fe ≤ 6,0	–	–	+
ХН70Ю	≤ 0,07	≤ 0,80	≤ 0,50	28,0... 31,0	»	0,15 Al; Fe ≤ 5,0	–	+	+
ХН67МВТЮ	≤ 0,08	≤ 0,60	≤ 0,50	17,0... 28,0	»	2,2... 2,8 Ti; 1,0... 1,5 Al; Fe ≤ 4,0; 4,0... 5,0 W; 4,0... 5,0 Mo; B ≤ 0,01; Ce ≤ 0,01	–	+	+

Примечание. Ост. — остальное.

газопроводные системы). Повышенная окалиностойкость данных сталей и сплавов достигается легированием алюминием (до 2,5 %) и вольфрамом (до 7 %). Эти легирующие элементы и кремний способствуют созданию прочных и плотных оксидов на поверхности изделий, предохраняющих металл от непосредственного контакта с газовой средой.

После соответствующей термообработки высоколегированные аустенитные и аустенитно-ферритные стали и сплавы обладают высокими прочностными и пластическими свойствами (табл. 1.19). В отличие от углеродистых при закалке эти стали приобретают повышенные пластические свойства.

Структуры высоколегированных сталей разнообразны и зависят в основном от их химического состава, т. е. содержания основных элементов: хрома (ферритизатора) и никеля (аустенитизатора). На структуру влияют и другие легирующие элементы: ферритизаторы — Si, Mo, Ti, Al, Nb, W, V; аустенитизаторы — C, Co, Ni, Cu, Nb, В.

Для приближенного определения характера структуры обычно пользуются диаграммой Шеффлера, предварительно подсчитав эквивалентные содержания никеля и хрома. Кроме того, структура высоколегированных сталей формируется за счет термической обработки пластической деформации и других факторов. Поэтому положение фазовых областей на диаграммах состояния определено в виде псевдобинарных разрезов тройных систем, как правило, Fe—Cr—Ni с углеродом.

Рассмотрим фазовые области для одной из таких систем (штриховая линия на рис. 1.15) при содержании 0,05 % С. При очень медленном охлаждении и затвердевании (точка 1 на линии ликвидус) из расплава вначале начинают выпадать кристаллы хромоникелевого феррита, имеющего решетку δ -железа, а по мере охлаждения — и кристаллы хромоникелевого аустенита, имеющего решетку γ -железа. После затвердевания всего расплава (температура ниже точки 2 на линии солидус) сталь имеет аустенитно-ферритную структуру. При дальнейшем охлаждении в точке 3 происходит превращение $\delta \rightarrow \gamma$, и сталь приобретает аустенитную структуру.

Углерод в аустенитно-ферритной и аустенитной сталях при температурах выше линии SE (выше точки 4) находится в твердом растворе в виде фаз внедрения. Медленное охлаждение стали ниже точки 4 приводит к выделению углерода из твердого раствора в виде химического соединения — карбидов хрома типа $Cr_{23}C_6$, располагающихся преимущественно по границам зерен. Дальнейшее охлаждение ниже точки 5 способствует выпадению по границам зерен вторичного феррита. Таким образом, сталь при медленном охлаждении при комнатной температуре имеет аустенитную структуру со вторичными карбидами и ферритом.

Таблица 1.19. Механические свойства высоколегированных аустенитных и аустенитно-ферритных сталей и сплавов

Марка стали	Вид термической обработки	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %
08X18H10	Закалка при 1 050 ... 1 100 °С, охлаждение на воздухе, в масле или воде	480	200	40
12X18H12T		550	200	40
10X17H13M2T		520	220	40
08X18H12Б		500	180	40
10X14П4Н4Т	Закалка при 1 000 ... 1 080 °С, охлаждение на воздухе, в масле или воде	650	250	35
08X22H6Т	Закалка при 950 ... 1 050 °С, охлаждение на воздухе	550	350	25
08X21H6M2Т	Закалка при 1 000 ... 1 050 °С, охлаждение на воздухе	700	450	25
09X17H7Ю	Закалка при 1 030 ... 1 070 °С, охлаждение на воздухе; первый отпуск при 740 ... 760, повтор- ный при 550 ... 600 °С, охлаждение на воздухе	850	700	10
20X23H18	Закалка при 1 050 ... 1 100 °С, охлаждение на воздухе, в масле или воде	500	200	35
20X25H20C2		600	300	35
ХН78Т	Закалка при 980 ... 1 020 °С, охлаждение на воздухе, в масле или воде	700	—	27,5
ХН67МВТЮ	Закалка при 1 200 °С, охлаждение на воздухе, старение при 850 °С в течение 15 ч	1 000 ... 1 100	550 ... 750	20 ... 30

Примечания: 1. См. примеч. 1 к табл. 1.2, примеч. 2 к табл. 1.6.
2. δ — относительное удлинение образца при разрыве.

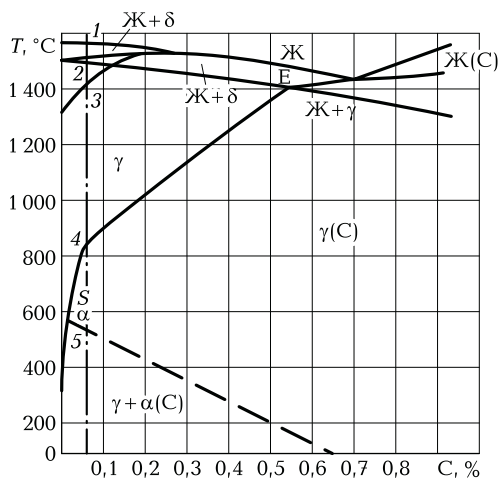


Рис. 1.15. Псевдобинарная диаграмма состояния при разном содержании углерода для сплава с 18 % Cr, 8 % Ni, 74 % Fe:

Ж — жидкое состояние; δ — δ -феррит; α — α -железо; γ — γ -железо; (C) — сорбит

В зависимости от скорости охлаждения с температур, лежащих выше линии SE , углерод частично или полностью выделяется из твердого раствора в виде карбидов. Этот процесс оказывает решающее влияние на свойства сталей. При быстром охлаждении (закалке) распад твердого раствора не успевает произойти, и аустенит фиксируется в пересыщенном и неустойчивом состоянии. Количество выпавших карбидов хрома, помимо скорости охлаждения, зависит и от количества углерода в стали. При его содержании менее 0,02... 0,03 %, т. е. ниже предела его растворимости в аустените, весь углерод остается в твердом растворе.

Ускоренное охлаждение стали в некоторых композициях аустенитных сталей может привести к фиксации в их структуре первичного δ -феррита, иногда необходимого с точки зрения предупреждения горячих трещин. Холодная деформация (рис. 1.16), в том числе и наклеп закаленной стали, в которой аустенит зафиксирован в неустойчивом состоянии, способствует превращению $\gamma \rightarrow \alpha$. Феррит, располагаясь тонкими прослойками по границам аустенитных зерен, блокирует плоскости скольжения и упрочняет сталь. Причем упрочнение тем выше, чем ниже температура деформации. Обычно тонколистовые хромоникелевые стали в состоянии поставки имеют высокие прочностные и низкие пластические свойства. Это объясняется их повышенной деформацией при прокатке и пониженной температурой окончания прокатки.

Если сталь, в которой не произошло выпадения карбидов и углерод зафиксирован в твердом растворе, медленно нагревать, под-

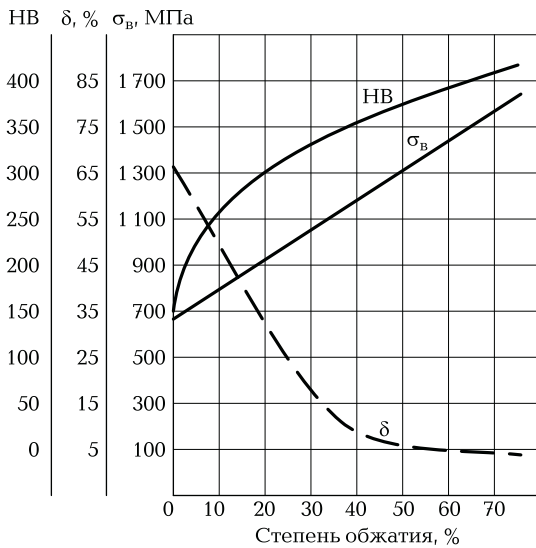


Рис. 1.16. Изменение механических свойств хромоникелевой стали (18 % Cr, 8 % Ni; 0,17 % C) в зависимости от степени холодной деформации (обжатия)

вижность атомов увеличится. В соответствии с этим увеличится и способность их к диффузии и восстановлению равновесия в твердом растворе, в котором аустенит зафиксирован в перенасыщенном и неустойчивом состоянии, что приводит к образованию и выделению карбидов из перенасыщенного твердого раствора. Этот процесс начинается при температурах 400... 500 °С, но из-за малой скорости диффузии идет медленно с образованием карбидов преимущественно по границам зерен.

Вследствие того, что скорость диффузии хрома значительно ниже, чем углерода, связываемый в карбид хром извлекается из ближайших к границе областей зерна, т.е. происходит местное обеднение твердого раствора хромом. При работе в коррозионной среде эти участки зерна растворяются, что приводит к нарушению связи между отдельными зернами (процесс МКК).

При температурах 600... 700 °С скорость диффузии более высокая и образование карбидов идет активнее, в большем количестве и более крупных размеров. При температурах 800... 900 °С карбиды появляются еще быстрее и коагулируют. Ввиду достаточно высокой скорости диффузии хром, связываемый в карбид, извлекается из более глубоких областей зерна, и местное обеднение границ зерна хромом уменьшается. При температурах выше 900 °С (выше температур линии SE на рис. 1.15) наряду с коагуляцией карбидов начинается обратный процесс их растворения с переходом углерода в

твердый раствор и образованием однородной массы аустенита. Быстрое охлаждение стали (закалка) опять фиксирует структуру аустенита в перенасыщенном и неустойчивом состоянии с углеродом, находящимся в твердом растворе. Как видно из рис. 1.15, температура закалки для получения подобной структуры (линия *SE*) становится выше при увеличении содержания углерода в стали. Подобная термическая обработка называется *закалкой на гомогенный твердый раствор (аустенитизация)* и для сталей типа 18—8 проводится с температур 1 050... 1 100 °С.

Межкристаллитная коррозия вызывается местным обеднением хромом металла зерна возле границы вследствие более низкой скорости диффузии хрома по сравнению с углеродом при температурах ниже 900 °С. Однако если сталь при этих температурах выдерживать достаточно длительное время, то, несмотря на малую скорость диффузии хрома, его концентрация по объему зерна (периферийная и центральная) будет выравниваться и склонность стали к МКК уменьшится. Такая термическая обработка называется *стабилизирующим отжигом* (его проводят обычно при температурах 850... 900 °С в течение 2... 3 ч).

В целом зависимость МКК от времени и температуры можно представить схемой (рис. 1.17). Кривая 1 показывает температурно-временные условия появления в швах склонности к МКК. При температурах до 650 °С скорость образования карбидов хрома возрастает при небольшой скорости диффузии хрома. В результате время выдержки металла $t_{кр}$ при рассматриваемой температуре до появления МКК сокращается и при температуре 650 °С может достигать нескольких минут.

Повышение температуры, увеличивая скорость диффузии хрома, уменьшает местное обеднение границ зерен хромом и склонность швов к МКК. Выдержка стали в рассматриваемом интервале температур, приводя к диффузионному выравниванию содержа-



Рис. 1.17. Зависимость появления склонности к межкристаллитной коррозии металла шва на аустенитной стали от температуры T и времени t

ния хрома по объему зерна, способствует приобретению металлом повторной стойкости к МКК (кривая 2). Уменьшение в стали содержания углерода легированием ее более сильными, чем хром, карбидообразователями (титан, ниобий и др.) сдвигает вправо кривую 1 начала появления склонности металла к МКК. Процессы, протекающие при образовании карбидов, не только влияют на появление такой склонности, но и сильно изменяют механические свойства сталей при комнатных и высоких температурах.

Изменение в стали содержания легирующих элементов влияет на положение фазовых областей. Основными легирующими элементами в рассматриваемых сталях служат хром и никель. В зависимости от их соотношения стали иногда разделяют на имеющие малый (процентное соотношение $Ni/Cr < 1$) и большой ($Ni/Cr > 1$) запас аустенитности.

Титан, ниобий, вольфрам и ванадий — карбидообразователи. Поэтому в стали могут появляться не только карбиды хрома, но и карбиды этих элементов (TiC , NbC , VC). При определенных содержаниях титана и ниобия весь свободный, выше предела его растворимости (0,02 %), углерод выделяется не в виде карбидов хрома, а в виде карбидов титана или ниобия. Выпадение карбидов повышает прочностные и понижает пластические свойства сталей.

Упрочнение, связанное с выделением карбидов, зависит от степени дисперсности — оно увеличивается с уменьшением размеров карбидов. Это свойство используют для дисперсионного упрочнения жаропрочных сталей, проводимого обычно в комплексе с интерметаллидным упрочнением. К интерметаллидным соединениям относят и α -фазу, которая образуется в хромоникелевых сталях при длительном нагреве или медленном охлаждении при температурах ниже 900...950 °С; α -фаза обладает ограниченной растворимостью в α - и γ -твердых растворах и, выделяясь преимущественно по границам зерен, резко снижает пластические свойства и ударную вязкость металла.

Повышенные концентрации в стали хрома (16...25 %) и элементов, способствующих образованию феррита (молибдена, кремния), вызывают образование при температурах 700...850 °С σ -фазы. Выделение этой фазы происходит преимущественно с образованием промежуточной фазы феррита ($\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \sigma$) или преобразованием δ -феррита ($\delta \rightarrow \gamma$). Однако возможно ее выделение и непосредственно из твердого раствора ($\gamma \rightarrow \sigma$). Холодная деформация, приводя к появлению дополнительных плоскостей сдвига, увеличивает количество выделившейся α -фазы. Выделение σ -фазы резко снижает служебные характеристики жаропрочных и жаростойких сталей.

Свариваемость. Для высоколегированных аустенитных и аустенитно-ферритных сталей и сплавов свариваемость затрудняется многокомпонентностью их легирования и разнообразием

условий эксплуатации сварных конструкций (требования коррозионной стойкости, жаростойкости или жаропрочности). Общей сложностью сварки является предупреждение образования в шве и околошовной зоне кристаллизационных горячих трещин, имеющих межкристаллитный характер, наблюдаемых в виде микронадрывов и мельчайших трещин. Горячие трещины возникают и при термической обработке или работе конструкции при повышенных температурах. Образование горячих трещин наиболее характерно для крупнозернистой структуры металла шва, особенно выраженной в многослойных швах, когда кристаллы последующего слоя продолжают кристаллы предыдущего.

Концентрационное и термическое переохлаждение способствует развитию дендритной или микроскопической ликвации. В аустенитных швах направленность столбчатых кристаллов выражена наиболее четко. Повышенное сечение и поэтому малая поверхность столбчатых кристаллов способствуют образованию межкристаллитных прослоек повышенной толщины, что и увеличивает вероятность образования горячих трещин. Применение методов, вызывающих измельчение кристаллов и дезориентацию структуры, а также утоньшение межкристаллитных прослоек, позволяет повысить стойкость швов против горячих трещин.

Один из таких методов — получение швов, имеющих в структуре некоторое количество первичного δ -феррита. Положительное действие феррита на предупреждение образования в аустенитно-ферритных швах горячих трещин связано с характером процесса первичной кристаллизации металла сварочной ванны. Одновременное выпадение из жидкой фазы кристаллов аустенита и первичного δ -феррита приводит к измельчению и дезориентации структуры, т.е. уменьшению сечения столбчатых кристаллов и уточнению межкристаллитных прослоек, разделенных участками первичного δ -феррита. В результате вероятность образования горячих трещин по местам расположения прослоек уменьшается.

Элементы, способствующие ферритизации металла, оказывают и обессеривающее действие на сварочную ванну, уменьшая количество легкоплавкой сульфидной эвтектики. Благоприятное действие δ -феррита объясняется также большей растворимостью в нем примесей, уменьшающей их ликвацию. Получение аустенитно-ферритных швов достигается их дополнительным легированием ферритообразующими элементами, такими как хром, кремний, алюминий, молибден и др. В изделиях, работающих как коррозионно-стойкие при температурах до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, допускается содержание феррита до 25 %. В швах на жаропрочных и жаростойких сталях, работающих при более высоких температурах, возможно образование хрупкой α -фазы (сигматизация) с соответствующим ухудшением служебных характеристик шва. С целью предупреждения

сигматизации швов количество δ -феррита в швах на жаропрочных и жаростойких сталях ограничивают 4...5 %.

При сварке сталей с большим запасом аустенитности получение швов с аустенитно-ферритной структурой затруднено из-за необходимости легирования их повышенным количеством ферритизаторов. Возможность предотвращения в швах на таких сталях, а также на аустенитно-ферритных сталях горячих трещин достигается ограничением содержания в швах вредных (фосфор, сера) и ликвидирующих примесей, образующих легкоплавкие эвтектики, возникающие на завершающейся стадии кристаллизации по границам столбчатых кристаллов. В этих случаях применяют сварочные материалы, минимально засоренные вредными и ликвидирующими элементами, например электродные проволоки, изготовленные из сталей вакуумной выплавки, электрошлакового переплава. Ограничивается также проплавление основного металла.

К повышению стойкости швов против горячих трещин иногда приводит, наоборот, увеличение качества ликвидирующих примесей до концентраций, обеспечивающих получение при завершении кристаллизации сплошной пленки легкоплавкой эвтектики на поверхности кристаллита. Это может происходить при легировании стали бором (0,3...0,5 %).

Повышенная литейная усадка и значительные растягивающие напряжения, действующие при затвердевании на сварочную ванну, также способствуют образованию горячих трещин, а снижение действия силового фактора (ограничение силы тока, заполнение разделки валиками небольшого сечения, рациональная конструкция соединения) — их предупреждению.

Помимо сложности получения на аустенитных высоколегированных сталях и сплавах швов без горячих трещин имеются и другие трудности, обусловленные спецификой их использования. К сварным соединениям на жаропрочных сталях предъявляется требование сохранения в течение длительного времени высоких механических свойств при повышенных температурах. Большие скорости охлаждения металла шва при сварке приводят к фиксации неравновесных по отношению к рабочим температурам структур. Во время эксплуатации при температурах выше 350 °С в результате диффузионных процессов в стали появляются новые структурные составляющие, приводящие обычно к снижению пластических свойств металла шва.

Термическое старение при температурах 350...500 °С может привести к появлению 475°-ной хрупкости. Выдержка аустенитно-ферритных швов при температурах 500...650 °С вызывает тепловое старение в основном за счет выпадения карбидов. Одновременно идет процесс образования α -фазы. Легирование титаном и ниобием приводит к дисперсионному упрочнению стали за счет образо-

вания прочных карбидов. Являясь ферритизаторами, титан и ниобий, способствуя образованию в шве ферритной составляющей, увеличивают количество α -фазы в металле. Выдержка при температурах 700...850 °С значительно интенсифицирует образование α -фазы с соответствующим охрупчиванием металла при более низких температурах и снижением предела ползучести при высоких температурах. При этих температурах возрастает роль и интерметаллидного упрочнения за счет образования, в частности, интерметаллидных фаз железа с титаном и ниобием.

Для аустенитных швов при тепловом старении наиболее важное значение имеют процессы карбидного и интерметаллидного упрочнения. Одно из эффективных средств уменьшения склонности сварных соединений жаростойких и жаропрочных сталей к охрупчиванию в результате выпадения карбидов — снижение в основном металле и металле шва содержания углерода. Наклеп, способствуя увеличению в шве содержания ферритной фазы, усиливает возможность их охрупчивания.

Вследствие высокого коэффициента теплового расширения суммарная внутренняя пластическая деформация металла шва и околошовной зоны при сварке высоколегированных сталей выше, чем низколегированных. В результате при сварке многослойных швов (многократная пластическая деформация), жестких и других соединений околошовная зона и нижние слои металла шва могут заметно упрочняться. Самонаклеп также увеличивает количество ферритной фазы, а значит, и вероятность охрупчивания (сигматизации) швов.

В ЗТВ некоторых жаропрочных аустенитных сталей под действием термического цикла сварки снижаются пластические и прочностные свойства, что может способствовать образованию в этой зоне трещин. Подобные изменения свойств основного металла вызываются развитием диффузионных процессов, приводящих к повышенной концентрации в металле околошовной зоны элементов (углерода, кислорода и др.), которые совместно с вредными примесями образуют легкоплавкие эвтектики. При длительной эксплуатации в этой зоне могут выделяться мелкодисперсные карбиды и интерметаллиды, коагуляция которых приводит также к охрупчиванию металла. При сварке таких сталей для предупреждения образования горячих трещин в шве часто получают металл шва, по составу отличающийся от основного и имеющий двухфазную структуру.

В процессе высокотемпературной эксплуатации происходит карбидное и интерметаллидное упрочнение металла шва и соответствующее снижение его пластических свойств, что приводит к локализации в околошовной зоне деформаций и образованию в ней трещин. Этому также способствуют высокий уровень остаточных

сварочных напряжений и рабочие напряжения. Предотвращение подобных локальных разрушений достигается термообработкой — аустенитизацией при температурах 1 050 ... 1 100 °С для снятия остаточных сварочных напряжений и самонаклепа и придания сварному соединению более однородных свойств. В ряде случаев аустенитизация сопровождается последующим стабилизирующим отжигом при температурах 750 ... 800 °С с целью получения относительно стабильных структур за счет выпадения карбидной и интерметаллидной фаз.

При сварке высокопрочных сталей в околошовной зоне возможно образование холодных трещин. Поэтому до сварки рекомендуется их аустенитизация для получения высоких пластических свойств металла, а после сварки — упрочняющая термическая обработка. Подбор химического состава металла шва, создание в нем благоприятных структур за счет выбора режима сварки и термообработки, снижение уровня остаточных напряжений вследствие уменьшения жесткости сварных соединений или термической обработки — основные пути предотвращения охрупчивания сварных соединений и образования в них холодных трещин. Этой цели служит предварительный или сопутствующий подогрев до 350... 450 °С.

При сварке жаростойких сталей под воздействием температуры в металле швов могут наблюдаться такие же структурные изменения, как и при сварке жаропрочных сталей. Высокая коррозионная стойкость жаростойких сталей в газовых средах при повышенных температурах определяется возможностью образования и сохранения на их поверхности прочных и плотных пленок оксидов. Для этого стали легируют хромом, кремнием, алюминием. Поэтому во многих случаях необходимая жаростойкость сварного соединения достигается максимальным приближением состава шва к составу основного металла. Часто к сварным соединениям жаростойких сталей предъявляется требование стойкости к газовой МКК.

Большинство жаростойких сталей и сплавов имеет достаточный запас аустенитности, поэтому в процессах нагревания и охлаждения при сварке фазовых превращений они не претерпевают, кроме карбидного и интерметаллидного дисперсионного твердения. При этом возможно образование холодных трещин в шве и околошовной зоне, предупреждение которых может быть достигнуто предварительным подогревом до 250 ... 550 °С.

Высоколегированные аустенитные стали и сплавы наиболее часто используют как коррозионно-стойкие. Основное требование, которое в этом случае предъявляется к сварным соединениям, — стойкость к различным видам коррозии. Межкристаллитная коррозия может развиваться в металле шва и основном металле у линии сплавления (ножевая коррозия) или на некотором удалении от шва

(рис. 1.18). Механизм развития многих видов коррозии одинаков, однако причины их возникновения различны.

Межкристаллитная коррозия в металле шва (рис. 1.18, а) возникает в результате выделения под действием термического цикла сварки из аустенита карбидов хрома, приводящего к местному обеднению границ зерен хромом. Основная причина этого — повышенное содержание в металле шва углерода и отсутствие либо недостаток титана или ниобия. Неблагоприятный термический цикл сварки — длительное пребывание металла шва в интервале критических температур — приводит к появлению склонности к МКК. Шов может потерять стойкость против МКК в результате воздействия критических температур при эксплуатации изделия. Аустенитно-ферритные швы с дезориентированной структурой имеют повышенную стойкость против МКК по сравнению с аустенитными.

Увеличение протяженности границ зерен за счет их измельчения увеличивает поверхности, на которых выделяются карбиды. Последние более дисперсны, и местное обеднение объема зерна хромом происходит на меньшую глубину. Кроме того, процессы диффузии в феррите протекают намного активнее, и выравнивание концентрации хрома в обедненных, а также центральных участках зерна осуществляется достаточно быстро.

Межкристаллитная коррозия в основном металле на некотором удалении от шва (рис. 1.18, б) вызывается также действием термического цикла сварки в той части изделия, где находилась изотерма критических температур.

Предупреждение склонности стали и швов к МКК достигается: снижением содержания углерода до пределов его растворимости в аустените (0,02...0,03 %); легированием более энергичными, чем хром, карбидообразующими элементами (стабилизация титаном, ниобием, танталом, ванадием); аустенитизацией (закалкой) с температур 1 050...1 100 °С (однако при повторном нагреве в интервале критических температур (500...800 °С) сталь снова приобретает склонность к МКК); стабилизирующим отжигом при температурах 850...900 °С в течение 2...3 ч; созданием аустенитно-ферритной структуры с содержанием феррита до 20...25 % путем дополнитель-

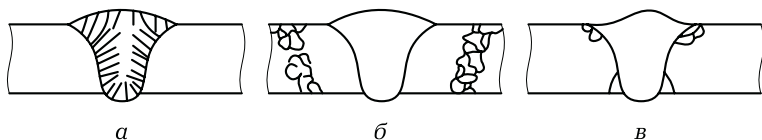


Рис. 1.18. Схемы межкристаллитной коррозии сварных соединений аустенитных сталей:

а — в металле шва; б — в основном металле; в — ножевая коррозия

ного легирования хромом, кремнием, молибденом, алюминием. В то же время их высокое содержание в структуре феррита может понизить стойкость металла к общей коррозии. Эти же меры способствуют и предупреждению ножевой коррозии.

Ножевая коррозия (рис. 1.18, в) имеет сосредоточенный характер и поражает основной металл. Этот вид коррозии развивается в сталях, стабилизированных титаном и ниобием, обычно на участках, которые нагревались до температур выше 1 250 °С. При этом карбиды титана и ниобия растворяются в аустените. Повторное тепловое воздействие на металл критических температур 500...800 °С (например, при многослойной сварке) приводит к сохранению титана и ниобия в твердом растворе и выделению карбидов хрома.

Общая коррозия представляет собой растворение металла в коррозионной среде и может развиваться преимущественно в металле шва, на различных участках зоны термического влияния или в основном металле. В некоторых случаях она развивается равномерно в основном металле и сварном соединении.

Наблюдается еще один вид коррозионного разрушения — коррозионное растрескивание, возникающее под общим действием растягивающих напряжений и агрессивной среды. Разрушение развивается как межкристаллитное, так и транскристаллитное. Снижение уровня остаточных сварочных напряжений — одна из основных мер борьбы с этим видом коррозионного разрушения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите легирующие элементы, определяющие прочностные свойства углеродистых сталей.
2. От каких процессов зависит структура шва и околшовной зоны при сварке?
3. Какой свариваемостью обладают углеродистые и низкоуглеродистые низколегированные стали?
4. Какие стали по чувствительности к термодформационному циклу сварки относят к низко- и среднелегированным закаливающимся сталям?
5. Назовите основной критерий, используемый для предварительной оценки температуры подогрева при сварке.
6. Перечислите основные технологические приемы, применяемые для предотвращения образования холодных трещин при сварке среднелегированных мартенситно-бейнитных сталей.
7. Какие присадочные материалы (электроды и проволоки) используют для сварки среднелегированных мартенситно-бейнитных сталей?

8. Какие процессы вызывают снижение прочности и пластичности металла в сварном соединении при эксплуатации изделий из жаропрочных перлитных сталей?
9. Перечислите основные требования, которые предъявляют к химическому составу присадочных материалов для сварки жаропрочных перлитных сталей.
10. Как изменяется структура высокохромистых сталей в зависимости от концентрации хрома и углерода?
11. Назовите состав присадочного металла, используемый для сварки хромистых сталей с целью уменьшения вероятности образования холодных трещин.
12. Какие виды подогрева и в каком диапазоне температур используют при сварке хромистых сталей для предотвращения образования холодных трещин?
13. Какие виды термической обработки применяют для повышения пластичности сварных соединений хромистых сталей?
14. Перечислите основные легирующие элементы в высоколегированных сталях.
15. Какова свариваемость высоколегированных сталей?
16. Какие технологические меры позволяют уменьшить вероятность образования горячих и холодных трещин?
17. В чем заключается суть стабилизирующего отжига и аустенизации?

ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ ДЛЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

2.1. МЕДЬ И МЕДНЫЕ СПЛАВЫ

2.1.1. Свойства и свариваемость меди

Свойства. Медь — пластичный и тяжелый металл (плотность $\gamma = 8,94 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) с высокой теплопроводностью (удельная теплопроводность $\lambda = 387 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$) и низким электросопротивлением (при 20°C удельное сопротивление $\rho = 1,68 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}$), а также с высокой коррозионной стойкостью, в том числе в морской воде. Это определяет широкое применение меди в электротехнической и химической промышленности, в судостроении и криогенной технике, в приборостроении, металлургической промышленности и других отраслях производства. В сварных конструкциях медь используют в основном в виде листов, лент, полос, труб и проволоки.

Химический состав и маркировка меди регламентируется ГОСТ 859—2001 «Медь. Марки» (табл. 2.1). Медь в зависимости от способа изготовления, определяющего чистоту по содержанию вредных примесей, подразделяется на четыре группы: бескислородная, катодная переплавленная, раскисленная и огневого рафинирования.

Марки меди обозначаются буквой «М» (медь) и цифрами, относящимися к максимально допустимому количеству вредных примесей в данной марке, но численно с ними не связанными, т. е. являющихся порядковыми номерами марок. С увеличением порядкового номера марки меди повышается максимально допустимое содержание примесей.

Например, в марке М1 содержание меди — не менее 99,9 %, сумма примесей — до 0,1 %; в марке М3 содержание меди — не менее 99,5 %, сумма примесей — до 0,5 %. Кроме того, обозначения марок меди дополнительно могут содержать буквы «б» (бескислородная) и «р» (раскисленная). Например, в марке М1 катодного переплава сумма примесей допускается до 0,1 %, в том числе кислорода до 0,05 %, а в марке М1р (раскисленной) сумма примесей также допускается до 0,1 %, в том числе до 0,01 %, т. е. в 5 раз меньше (см. табл. 2.1), что значительно улучшает свариваемость меди.

Таблица 2.1. Химический состав некоторых марок меди

Марка меди	Содержание меди, %, не менее	Допустимое содержание примесей, %, не более								Группа в зависимости от способа изготовления
		Pb	Bi	Sn	Sb	As	S	O ₂	P	
M00б	99,99	0,001	0,0005	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,0005	Бескислородная
M0б	99,97	0,003	0,0010	0,002	0,002	0,002	0,003	0,001	0,0020	
M1б	99,95	0,004	0,0010	0,002	0,002	0,002	0,004	0,001	0,0020	
M1у	99,90	0,004	0,0005	0,001	0,002	0,001	0,004	0,020	—	Катодная переплавленная
M1	99,90	0,005	0,0010	0,002	0,002	0,002	0,004	0,050	—	Раскисленная
M1р	99,90	0,005	0,0010	0,002	0,002	0,002	0,004	0,010	0,0120	
M1ф	99,90	0,005	0,0010	0,002	0,002	0,002	0,004	—	0,0600	
M2р	99,70	0,010	0,0020	0,05	0,005	0,010	0,010	0,010	0,0600	
M3р	99,50	0,030	0,0030	0,05	0,050	0,050	0,010	0,010	0,0600	
M2	99,70	0,010	0,0020	0,05	0,005	0,010	0,010	0,070	—	Огневого рафинирования
M3	99,50	0,050	0,0030	0,05	0,050	0,010	0,010	0,080	—	

Примечание. Знак «—» означает, что эта примесь не нормируется.

Таблица 2.2. Сравнение электропроводности и теплопроводности некоторых металлов с медью

Свойство	Балл, %						
	Cu	Ag	Al	Mg	Zn	Ni	Fe
Электропроводность	100	106	62	39	29	25	17
Теплопроводность	100	108	56	41	29	15	17

Таблица 2.3. Типичные механические свойства меди в разных состояниях

Состояние	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	НВ
Литое	35	160	25	40
Горячедеформированное	95	240	45	50
Холоднодеформированное при деформации:				
10 %	190	270	38	80
20 %	270	320	15	105
90 % (проволока)	400	450	3	125
Холоднодеформированное и отожженное	75	220	50	55

Примечания: 1. См. примеч. 1 к табл. 1.2, примеч. 2 к табл. 1.6.
2. НВ — твердость по Бринеллю.

Поскольку медь обладает высокой электропроводностью и теплопроводностью, в технике принято оценивать эти свойства баллом 100 %, а все другие металлы и сплавы сравнивать с медью (табл. 2.2).

Механические свойства меди приведены в табл. 2.3. Все примеси в этом металле оказывают большое влияние на его физико-химические и механические свойства. Примеси в меди условно подразделяют на три группы:

- элементы с очень малой растворимостью в твердой меди (висмут, свинец), которые резко снижают пластичность в температурном интервале 400...800 °С и вызывают растрескивание металла при горячей обработке;
- элементы, ограниченно растворимые в твердой меди (кислород, фосфор, сера), образующие хрупкие фазы по границам кристаллитов;

- элементы, образующие при их относительно высоком содержании (до 1 % и более) твердые растворы (железо, никель, мышьяк).

Примеси всех трех групп снижают электропроводность и теплопроводность меди. Особенно вредное влияние оказывает кислород, ухудшающий механические и технологические свойства меди, а также ее коррозионную стойкость.

Коррозионная стойкость. В зависимости от агрессивности среды медь имеет различные характеристики коррозионной стойкости.

Атмосферная среда, пресная и морская вода. Медь весьма устойчива против атмосферной коррозии вследствие образования на поверхности тонкой защитной пленки, состоящей в основном из серной соли.

Пресная вода вызывает незначительную коррозию, но в присутствии хлоридов, кислот, аммиака и сероводорода, препятствующих образованию защитной пленки на поверхности меди, скорость коррозии значительно увеличивается. Конденсат водяного пара при отсутствии кислорода и углекислого газа практически не вызывает коррозии.

В морской воде при малых скоростях ее движения коррозия меди незначительна и составляет примерно 0,05 мм/год, что обусловлено образованием защитной пленки, состоящей из оксихлорида меди.

Щелочи и соли. Медь устойчива в щелочах (NaOH, KOH) и щелочных растворах, но не стойка в щелочных цианистых соединениях. Устойчива в растворах различных солей (в хлориде кальция и сульфате алюминия, карбонате и сульфате натрия, нитриде натрия).

Кислоты и спирты. Медь обладает высокой коррозионной стойкостью в органических кислотах (лимонной, молочной, щавелевой, уксусной, жирных кислотах и др.), а также в спиртах (метиловом, пропиловом, феноловом), но сильно корродирует в окислительных минеральных кислотах, в кислых растворах хромовых солей, а кроме того, под действием серы и ее соединений.

Газы. Сухие газы-галогены при нормальной температуре вызывают незначительную коррозию, но при наличии влаги скорость коррозии увеличивается. Медь сильно корродирует под действием аммиака.

Свариваемость. Медь сваривается всеми способами сварки плавлением, в том числе ручной дуговой покрытыми, а также угольными (графитовыми) электродами. Однако на свариваемость и качество сварных соединений оказывает влияние не только чистота основного металла (низкое содержание вредных примесей), но и особые физико-химические свойства меди. Высокая интенсивность реакции меди с кислородом (окисляемость) приводит к образова-

нию хорошо растворимого в жидком металле оксида меди (Cu_2O), который образует с медью легкоплавкую эвтектику ($\text{Cu}—\text{Cu}_2\text{O}$), располагающуюся при кристаллизации по границам зерен и охрупчивающую металл шва.

Легкоплавкие эвтектики, охрупчивающие как основной, так и наплавленный металл, образуют также вредные примеси: сера ($\text{Cu}—\text{Cu}_2\text{S}$), свинец ($\text{Cu}—\text{PbO}—\text{PbO}_2—\text{PbO}_3$), висмут ($\text{Cu}—\text{BiO}—\text{Bi}_2\text{O}_3—\text{Bi}_2\text{O}_5$) и др.

При содержании кислорода в меди более 0,01 % получение плотных швов (без пор) практически невозможно. Механические свойства сварных соединений существенно зависят от содержания кислорода в свариваемом основном металле. Поэтому ответственные сварные конструкции следует изготавливать из бескислородной (М0б) или раскисленной меди (М1р, М3р), а покрытия электродов должны содержать сильные раскислители.

Отрицательное влияние на свариваемость меди оказывает также водород, который хорошо растворяется в жидкой меди и вызывает образование пор в швах и трещин в околошовной зоне сварных соединений, получившее название «водородная болезнь». Это обусловлено тем, что растворенный в расплавленном металле водород диффундирует в околошовную зону и при наличии в металле диоксида меди взаимодействует с ней по реакции



Образующиеся при этом пары воды скапливаются между кристаллитами в виде тонких газообразных прослоек и при охлаждении создают большое давление, приводящее к образованию трещин в температурном интервале хрупкости меди 300...350 °С.

Влияние азота на свариваемость меди оценивается по-разному. В основном азот по отношению к расплавленной меди рассматривается как инертный газ, что подтверждается возможностью сварки меди не только в смеси аргона с азотом, но и в чистом азоте. Однако в условиях сварки плавлением возможна абсорбция азота расплавленным металлом, а выделение его при кристаллизации сварочной ванны способствует образованию пор. Получение плотных сварных швов при азотодуговой сварке меди возможно лишь при использовании присадочной проволоки, легированной нитридообразующими элементами.

Эффективным средством снижения газонасыщенности меди кислородом и водородом является электрошлаковый переплав.

Затруднения при сварке меди создает ее высокая теплопроводность, а также жидкотекучесть. Вследствие интенсивного теплоотвода для расплавления кромок свариваемого изделия необходимы повышенные режимы сварки, а при толщине металла более 4 мм — предварительный (до 300 °С), а иногда и сопутствующий подогрев.

При толщине 20 мм и более хорошее качество швов обеспечивается при подогреве до температур 700... 750 °С.

Большая жидкотекучесть меди ограничивает возможность ее сварки в различных пространственных положениях швов, кроме нижнего или близкого к нему (наклонного).

Отрицательное влияние на свариваемость меди оказывает также ее большой коэффициент линейного теплового расширения ($16,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ — в 1,5 раза больше, чем у перлитных углеродистых и легированных сталей) и большая усадка (4,1 % — в 2 раза больше, чем у стали), что вызывает появление повышенных деформаций и остаточных сварочных напряжений. Это способствует образованию трещин в интервале температур 250... 550 °С, когда металл достигает минимальной пластичности и прочности.

Для предотвращения образования трещин, вызываемых деформациями и напряжениями, следует избегать жесткого закрепления свариваемых элементов, а при выполнении многослойных швов производить проковку каждого слоя (после первого) при температуре металла шва не выше 200 °С, когда он имеет повышенную пластичность.

2.1.2. Свойства и свариваемость безоловянных бронз

Свойства. Бронзами называются сплавы на основе меди, легированные алюминием, оловом, марганцем, железом и другими элементами. Бронзы подразделяются на две основные группы:

- безоловянные, не содержащие олова в качестве легирующего элемента;
- оловянные, в которых основным легирующим элементом является олово.

В свою очередь, безоловянные бронзы в зависимости от основного легирующего элемента подразделяют на алюминиевые, марганцевые, кремниевые, хромовые, бериллиевые и др.

Если бронзы легированы несколькими элементами, то их соответственно называют алюминированномарганцевыми, алюминированноникелевыми, алюминированожелезными, алюминированожелезомарганцевыми. В зависимости от назначения и механических свойств бронзы относят к литейным и обрабатываемым давлением (деформируемым).

Для всех медных сплавов принята система обозначения марок, несколько отличная от маркировки сталей. Марки *деформируемых бронз* (ГОСТ 18175—78 «Бронзы безоловянные, обрабатываемые

давлением. Марки» и ГОСТ 5017—2006 «Бронзы оловянные, обрабатываемые давлением. Марки» состоят из букв «Бр» (бронза), за которыми следуют начальные буквы русских названий легирующих элементов (табл. 2.4). После них в той же последовательности указываются числа, обозначающие среднее содержание этих элементов в процентах по массе. Например, марка БрАМц9-2 означает, что данная бронза содержит в среднем 9 % алюминия и 2 % марганца, БрАЖН10-4-4 содержит 10 % алюминия, 4 % железа и 4 % никеля, остальное — медь и примеси.

В отличие от деформируемых бронз с 1980 г. изменена маркировка литейных бронз (ГОСТ 493—79 «Бронзы литейные безоловянные. Марки» и ГОСТ 613—79 «Бронзы литейные оловянные. Марки», согласно которым цифры, обозначающие среднее содержание легирующих элементов, указываются сразу после буквы условного обозначения каждого легирующего элемента, т. е. аналогично маркировке, принятой для высоколегированных сталей. Например, вместо прежнего обозначения бронзы марки БрОЦС312-5 установлено обозначение БрОЗЦ12С5. Если данная марка изготовляется как литейная, так и деформируемая, то в обозначении марки литейной бронзы указывается в конце марки буква «Л». Например, деформируемая бронза обозначается БрАМц9-2, литейная — БрА9Мц2Л.

Таблица 2.4. Условные обозначения элементов в марках цветных металлов и сплавов

Элемент	Обозначение	Элемент	Обозначение
Алюминий	А	Никель	Н
Бериллий	Б	Олово	О
Бор	Бо	Свинец	С
Железо	Ж	Серебро	Ср
Кадмий	Кд	Сурьма	Су
Кремний	К	Титан	Т
Магний	Мг	Фосфор	Ф
Марганец	Мц	Хром	Х
Медь	М	Цинк	Ц
Мышьяк	Мш	Редкоземельные	Рз

Указание в обозначении марок среднего содержания легирующих элементов обеспечивает возможность сравнения и оценки типичных химических составов бронз по их маркировке.

Химический состав некоторых наиболее распространенных марок, обрабатываемых давлением, и литейных безоловянных бронз приведен в табл. 2.5, а механические свойства литейных безоловянных бронз в зависимости от способа литья — в табл. 2.6.

Таблица 2.5. Химический состав безоловянных бронз

Марка	Массовая доля, %						
	основных компонентов*						при- месей, всего, не более
	Al	Fe	Mn	Ni	Si	Pb	
<i>Бронзы, обрабатываемые давлением</i>							
БрА5	4...6	—	—	—	—	—	1,1
БрА7	6...8	—	—	—	—	—	1,1
БрАМц9-2	8...10	—	1,5...2,5	—	—	—	1,5
БрАМц10-2	9...11	—	1,5...2,5	—	—	—	1,7
БрАЖ9-4	8...10	2...4	—	—	—	—	1,7
БрАЖМц10-3-1,5	9...11	2...4	1...2	—	—	—	0,7
БрАЖН10-4-4	9,5...11	3,5... 5,5	—	3,5... 5,5	—	—	0,6
БрАЖМц9-4-4-1	8,8...10	4...5	0,5...1,2	4...5	—	—	0,7
БрКМц3-1	—	—	1...1,5	—	2,7... 3,5	—	1,0
БрМц5	—	—	4,5...5,5	—	—	—	0,9
<i>Бронзы литейные</i>							
БрА9Мц2Л	8...9,5	—	1,5...2,5	—	—	—	2,8
БрА10Мц2Л	9,6...11	—	1,5...2,5	—	—	—	2,8
БрА9ЖЗЛ	8...10,5	2...4	—	—	—	—	2,7
БрА10ЖЗМц2	9...11	2...4	1...3	—	—	—	1,0
БрА10Ж4Н4Л	9,5...11	3,5... 5,5	—	3,5... 5,5	—	—	1,5

Марка	Массовая доля, %						
	основных компонентов*						при- месей, всего, не более
	Al	Fe	Mn	Ni	Si	Pb	
БрА11Ж6Н6	10,5... 11,5	5...6,5	—	5... 6,5	—	—	1,5
БрАЖ4Н14Мц1	8,8... 10	4...5	0,5... 1,2	4...5	—	—	1,2
БрС30	—	—	—	—	—	27... 31	0,9

* Остальное — медь.

Безоловянные бронзы наиболее широко распространены в промышленности, поскольку по многим свойствам (эрозионной стойкости, жаропрочности, жаростойкости и др.) превосходят оловянные бронзы.

Двойные (т.е. состоящие из двух компонентов) алюминиевые бронзы, содержащие до 8 % алюминия (БрА5, БрА7), имеют однофазную структуру твердого α -раствора, а при более высоком содержании алюминия структура становится двухфазной — $\alpha + \gamma_2$, где γ_2 — твердый раствор, образующийся в результате эвтектоидного распада высокотемпературной β -фазы при 565 °С ($\beta \rightarrow \alpha + \gamma_2$) в условиях медленного охлаждения. Однако эвтектоидный распад β -фазы при больших скоростях охлаждения (имеющих место при сварке) задерживается, и она сохраняется в структуре сплава. Поэтому при сварке и наплавке двухфазных алюминиевых бронз вследствие очень больших скоростей охлаждения возможно наличие в сварных швах и наплавленном металле, а также в околошовной зоне сварных соединений нераспавшихся высокотемпературных фаз, что оказывает влияние на их механические свойства.

Однофазные алюминиевые бронзы имеют высокую пластичность и хорошо обрабатываются давлением, поэтому их применяют преимущественно как деформируемые.

Бронзы с гетерогенной структурой имеют повышенную прочность и пониженную пластичность, поэтому используются преимущественно как литейные.

Сплавы системы Cu—Al, содержащие более 14 % алюминия, практически не применяют из-за очень низкой пластичности.

Высокое содержание алюминия в безоловянных бронзах резко уменьшает их теплопроводность и электропроводность по сравне-

Таблица 2.6. Механические свойства и область применения литейных безоловянных бронз

Марка бронзы		Способ литья	$\sigma_{в}$, МПа	δ_{5l} , %	НВ	Область применения
по ГОСТ 493—79	по ГОСТ 493—54		не менее			
БрА9Мц2Л	БрАМц9-2Л	К	392	20	784	Антифрикционные детали арматуры, работающие в пресной воде, жидком топливе и паре при температуре до 250 °С
		П	392	20	784	
БрА10Мц2Л	БрАМц10-2	К	490	12	1 078	То же
		П	490	12	1 078	
БрА9Ж3Л	БрАЖ9-4Л	К	490	12	980	Арматура, антифрикционные детали
		П	392	10	980	
БрА10Ж3Мц2	БрАЖМц10-3-1,5	К	490	12	1 176	То же
		П	392	10	980	
БрА10Ж4Н4Л	БрАЖН10-4-4Л	К	587	6	1 666	Детали химической и пищевой промышленности, а также детали, работающие при повышенных температурах
		П	587	5	1 568	
БрА11Ж6Н6	БрАЖН11-6-6	К	587	2	2 450	Арматура, антифрикционные детали
		П	587	2	2 450	
БрА9Ж4Н4Мц1	—	К	587	12	1 568	Арматура для морской воды
		П	587	12	1 568	
БрС30	БрС30	К	587	4	245	Антифрикционные детали

П р и м е ч а н и я: 1. Условное обозначение способа литья: К — литье в кокиль; П — литье в песчаную форму.

2. См. примеч. 1 к табл. 1.2, примеч. 2 к табл. 2.3.

3. ГОСТ 493—79 введен взамен ГОСТ 493—54 в части литейных бронз.

нию с медью, что значительно улучшает их свариваемость. Теплопроводность алюминиевых бронз, содержащих в среднем 10 % алюминия, снижается в 6 раз по сравнению с чистой медью. Снижается также электропроводность алюминиевых бронз. Так, электропроводность бронзы, содержащей 8... 10 % алюминия, составляет лишь 15 % от электропроводности меди при 20 °С.

Кроме алюминия на физико-химические и механические свойства алюминиевых бронз значительное влияние оказывает легирование железом, марганцем, никелем и другими элементами. Двухфазные сплавы на основе меди, легированные алюминием и никелем, упрочняются за счет преимущественного твердения α -фазы, составляющей основу сплава, в которой выделяются интерметаллические соединения типа Ni_3Al и $NiAl$, или за счет повышения содержания в сплаве высокотемпературной β -фазы и продуктов ее распада.

По механизму упрочнения промышленные алюминиевые бронзы подразделяют на две основные группы, имеющие принципиальное различие: сплавы системы $Cu - Al - Ni - Mn$; сплавы системы $Cu - Al - Ni - Mn - Fe$.

Бронзы первой группы (содержание 7... 10 % Al, 8... 13 % Ni и 1,5... 2 % Mn) — дисперсионно-упрочняемые, уровень их механических свойств определяется уровнем распада пересыщенного твердого раствора.

Существенным недостатком этих бронз является узкий температурный интервал старения, при котором достигается оптимальное сочетание прочностных и пластических свойств сплавов (430... 440 °С). Обеспечить его в производственных условиях при термической обработке и сварке очень сложно. Отклонение режимов термической обработки ниже интервала оптимальных температур приводит к «недостариванию», т. е. получению пониженных прочностных характеристик сплава, а при отклонении выше оптимальной температуры происходит «перестаривание» — охрупчивание сплава из-за резкого снижения пластичности и увеличения прочности. Поэтому сварку бронз и заварку дефектов отливок первой группы производят после закалки до старения, когда сплав имеет наибольшую пластичность.

Бронзы второй группы (содержащие 7... 9 % Al, до 5,5 % Ni, 2... 8 % Mn и 0,2... 3 % Fe) легированы никелем значительно экономнее, и при увеличении его содержания от 0 до 5 % количество β -фазы в структуре возрастает, а зерна α -фазы измельчаются. Оптимальные механические свойства при этом достигаются соотношением количества α - и β -фаз и отпуском в достаточно широком интервале температур (600... 700 °С), что снижает возможность охрупчивания сплава при термической обработке, а также в околошовной зоне при сварке.

Коррозионная стойкость. Алюминиевые бронзы обладают высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях и различных агрессивных средах.

Атмосферная среда, пресная и морская вода. Алюминиевые бронзы проявляют высокую стойкость в этих средах, за исключением условий работы при высоких скоростях движения жидкой среды. В морской воде наиболее стойки бронзы, легированные никелем и железом, наименее стойки — не содержащие никеля.

В синтетической морской воде коррозионной стойкостью обладают высокопрочные бронзы, легированные никелем, железом и марганцем, металлы, наплавленные электродами, разработанными для сварки этих бронз. Испытания проводились при статическом положении образцов в морской воде и при движении сварных дисков со скоростью 1 600 об/мин, что соответствовало действию агрессивной среды в районе сварных швов со скоростью 12 м/с.

При статических испытаниях в течение 2 000 ч и температуре морской воды 75 °С максимальная скорость коррозии не превышала 0,006 мм/год для основного металла и 0,007 мм/год для наплавленного, т. е. была практически одинакова. При движении агрессивной среды относительно поверхности сварного соединения в течение 2 400 ч диски оставались блестящими, без каких-либо следов локальных разъеданий. Но скорость коррозии по сравнению со статическим положением образцов в морской воде увеличилась и составила 0,044 мм/год. С течением времени скорость коррозии уменьшилась вследствие образования оксидной пленки, прочно сцепленной с основой.

Благодаря высокой стойкости бронз и металла сварных швов системы Cu—Al—Ni—Mn—Fe их широко применяют в судостроении для изготовления ответственных конструкций, работающих в контакте с морской водой. Высокой коррозионной стойкостью и технологической прочностью обладает также металл, наплавленный проволокой марки БрАЖНМц8,5-4-5-1,5, разработанной для сварки литых и деформируемых бронз БрА9Ж4Н4, БрА9Ж4Н4Мц1 и БрАЖНМц9-4-4-1.

Щелочи. В сухих щелочах более стойки однофазные алюминиевые бронзы с пониженным содержанием алюминия. Кремниевые бронзы обладают удовлетворительной стойкостью в едких щелочах, но слабо противостоят их действию в растворах и при повышенных температурах.

Кислоты. Алюминиевые бронзы стойки в большинстве органических кислот (молочной, уксусной, лимонной), в растворах серной кислоты и сульфитных составах при производстве целлюлозы. В азотной и соляной кислотах безоловянные алюминиевые и кремниевые бронзы нестойки.

Кремниевые бронзы также стойки в органических кислотах и концентрированной (50...70 %) холодной серной кислоте. При слабых концентрациях (20 %) они малостойки. Могут применяться в неокислительных разбавленных кислотах и непригодны для окислительных кислот.

Соли и их растворы. Безоловянные бронзы стойки в углекислых растворах. Однофазные алюминиевые бронзы наиболее стойки в растворах сернокислых солей.

Кремниевые бронзы обладают хорошей стойкостью против сульфата меди, перманганата калия, хлорида натрия, горячих сульфитных растворов и насыщенных растворов известковой воды. Агрессивными средами для кремниевых бронз являются растворы солей железа, меди, олова, хромистых кислот, а также аммиачные соли и кислые рудничные воды.

Органические соединения. Все безоловянные бронзы обладают хорошей стойкостью в нефти, бензине, бензоле, спирте.

Газы. Алюминиевые бронзы стойки в атмосфере сухих газов (хлора, фтора, брома, сероводорода), менее стойки в этих средах при наличии влаги и совсем нестойки в аммиаке и ацетилене.

Алюминиевые бронзы имеют очень высокую эрозионную стойкость (превосходят оловянные бронзы в 5—12 раз и коррозионно-стойкие стали в 2—3 раза).

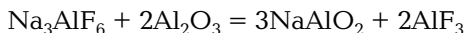
Свариваемость. Безоловянные алюминиевые бронзы свариваются всеми способами сварки плавлением, в том числе ручной дуговой сваркой покрытыми электродами. При заварке дефектов в отливках и поковках этот способ является основным. Пониженная теплопроводность алюминиевых бронз по сравнению с медью улучшает их свариваемость и позволяет производить сварку сравнительно больших толщин (20...25 мм) без подогрева многослойными швами и наплавками.

Однако наличие в составе этих бронз алюминия отрицательно влияет на их свариваемость, что обусловлено образованием в расплавленном металле тугоплавкой оксидной пленки Al_2O_3 , имеющей температуру плавления 2050 °С. Пленка препятствует сплавлению основного металла с наплавленным (и между валиками при многослойной сварке), а также способствует образованию пор и шлаковых включений в сварных швах и наплавках.

При сварке сложнoleгированных алюминиевых бронз пленка Al_2O_3 образуется не только вследствие взаимодействия расплавленного металла с кислородом воздуха, но и в результате происходящих в сварочной ванне реакций восстановления алюминия оксидов меди, марганца, железа, так как алюминий обладает более высоким сродством к кислороду по сравнению с этими элементами.

Термодинамическими расчетами, выполненными с учетом концентрации реагирующих веществ для температур, близких к тем-

пературам сварочной ванны, показана невозможность восстановления алюминия из оксидной пленки Al_2O_3 , находящейся на поверхности металла и в шлаке. Поэтому при ручной дуговой сварке покрытыми электродами пленку Al_2O_3 удаляют путем ее растворения и смывания криолитом и фтористыми соединениями щелочноземельных металлов, которые вводятся в электродные покрытия:



Оксиды алюминия отрицательно влияют на свариваемость алюминиевых бронз не только вследствие того, что препятствуют сплавлению наплавленного металла с основным, но и потому, что способствуют образованию пор в наплавленном металле и сварных швах. В порах содержатся газы, растворимость которых резко снижается при кристаллизации расплавленного металла, и они не успевают выделиться из него при быстром охлаждении сварочной ванны. Кислород и азот не оказывают существенного влияния на образование пор в сварных швах и наплавках алюминиевых бронз, так как содержание азота, растворяющегося в металле, незначительно, а кислород расходуется на образование оксида алюминия и оксидов других элементов, вводимых через покрытие в качестве раскислителей. Основную массу газов, растворенных в расплавленном металле при сварке алюминиевых бронз, составляет водород. Включения тугоплавких оксидов Al_2O_3 служат центрами кристаллизации в расплавленном металле, вокруг которых скапливается водород, образуя поры. Растворимость водорода снижается при увеличении концентрации алюминия, что является дополнительным фактором для увеличения склонности к пористости наплавленного металла и сварных швов алюминиевых бронз.

Основным фактором, ухудшающим свариваемость медных сплавов, является их высокая склонность к образованию трещин. Легирование наплавленного металла алюминиевых бронз марганцем, никелем и железом не повышает склонности к образованию пор и увеличивает стойкость против образования горячих трещин в сварных швах, имеющих двухфазную структуру. Это обусловлено тем, что двухфазные алюминиевые бронзы обладают высокой пластичностью при температурах выше $750^\circ C$. Легирование же однофазных бронз приводит к упрочнению α -твердого раствора, что снижает его стойкость против образования горячих трещин.

Следует учитывать, что все алюминиевые бронзы имеют провал пластичности в интервале температур $250 \dots 700^\circ C$, что требует при сварке быстрого охлаждения в интервале этих температур. Для этого сварку выполняют короткими валиками с перерывами на охлаждение до температур ниже $200^\circ C$. Величина температурного интервала провала пластичности каждого сплава зависит от величины его эффективного интервала кристаллизации. С увеличением по-

следнего увеличиваются температурный интервал провала пластичности и склонность к трещинообразованию, и наоборот.

Трещины в сварных конструкциях из медных сплавов отсутствуют, если величина относительного удлинения сплава в температурном интервале провала пластичности составляет не менее 10 %.

2.1.3. Свойства и свариваемость оловянных бронз

К оловянным бронзам относятся сплавы не только меди с оловом, но и более сложные меднооловянные сплавы, легированные дополнительно фосфором, цинком, никелем, свинцом и другими элементами, влияющими на их механические и физико-химические свойства.

Оловянные бронзы, как и алюминиевые, в зависимости от назначения разделяют на деформируемые и литейные. Маркировка оловянных бронз аналогична маркировке алюминиевых бронз.

Оловянные бронзы имеют очень широкий температурный интервал кристаллизации, и однофазная область твердого α -раствора существует только при повышенных температурах. При температуре 350 °С в результате эвтектоидного распада образуется двухфазная структура $\alpha + \text{Cu}_3\text{Sn}$ (ε -фаза). В стандартных деформируемых бронзах содержание олова находится в пределах 3...8,5 % (табл. 2.7), а в литейных — 2...11 % (табл. 2.8).

Сплавы с низким содержанием олова (БрОФ4-0,1, БрОЦ4-3) после деформации и отжига приобретают однофазную структуру α -твердого раствора. Оловянные бронзы обладают высокими литейными свойствами и меньшей объемной усадкой по сравнению с алюминиевыми бронзами и латунями, что позволяет получать очень сложные фасонные отливки с резкими переходами от тонких сечений к толстым. С увеличением содержания олова в сплавах возрастают прочностные свойства, а пластичность и ударная вязкость снижаются (рис. 2.1).

Оловянные бронзы отличают высокие антифрикционные свойства (очень низкий коэффициент трения) и хорошая притираемость со сталью. В этом они превосходят все медные сплавы, благодаря чему широко используются для изготовления подшипников скольжения, в том числе наплавками на сталь. Наиболее высокими антифрикционными свойствами обладают оловянно-свинцовые бронзы.

Коррозионная стойкость. В зависимости от вида агрессивной среды и температуры коррозионная стойкость оловянных бронз существенно изменяется. Такие бронзы не подвержены обесцинкованию, как латуни, или обезалюминиванию, как алюминиевые бронзы, при эксплуатации в морской воде.

Таблица 2.7. Химический состав оловянных бронз, обрабатываемых давлением

Марка бронзы	Массовая доля, %					
	основных компонентов*					примесей, не более
	Sn	P	Zn	Ni	Pb	
БрОФ8-0,3	7,5... 8,5	0,25... 0,35	—	0,10... 0,20	—	0,1
БрОФ7-0,2	7,0... 8,0	0,10... 0,25	—	—	—	0,1
БрОФ6,5-0,4	6,0... 7,0	0,26... 0,40	—	0,10... 0,20	—	0,1 (Pb ≤ 0,02)
БрОФ6,5-0,15	6,0... 7,0	0,10... 0,25	—	0,10... 0,20	—	0,1 (Pb ≤ 0,02)
БрОФ4-0,25	3,5... 4,0	0,20... 0,30	—	—	—	0,1 (Pb ≤ 0,02)
БрОЦ4-3	3,5... 4,0	—	2,7... 3,3	—	—	0,2 (Pb ≤ 0,02)
БрОЦС4-4-2,5	3,0... 5,0	—	3,0... 5,0	—	1,5... 3,5	0,2
БрОЦС4-4-4	3,0... 5,0	—	3,0... 5,0	—	3,5... 4,5	0,2

* Остальное — медь.

С увеличением содержания олова коррозионная стойкость бронз возрастает, а с повышением температуры агрессивной среды снижается.

Атмосферная среда, пресная питьевая и промышленная вода. Все марки оловянных бронз весьма стойки в данных средах, в том числе и в условиях тропического климата.

Морская вода. Стойкость оловянных бронз в морской воде выше, чем у меди и латуней, и составляет 0,018...0,04 мм/год для наиболее распространенных марок (БрО10Ц2, БрО6Ц6С3, БрОФ6,5-0,4). Особенно резко повышается коррозионная стойкость при легировании оловянных бронз никелем. Например, для бронзы БрОЦН6-3-6 она составляет до 0,005 мм/год.

Кислоты. Все марки оловянных бронз стойки в органических кислотах (уксусной, лимонной, фосфорной и разбавленной серной). Нестойки в концентрированных серной и соляной, а также в азотной и хромовой кислотах.

Щелочи. В растворах натронных щелочей и аммиака все марки оловянных бронз нестойки. В растворах едкого калия, сульфата натрия — стойки.

Таблица 2.8. Химический состав литейных оловянных бронз

Марка бронзы		Массовая доля, %						примесей, не более
		основных компонентов*						
по ГОСТ 613—79	по ГОСТ 613—65	Sn	Zn	Pb	P	Ni		
БрО3Ц12С5	БрОЦС3-12-5	2,0 ... 3,5	8,0 ... 15,0	3,0 ... 6,0	—	—	1,3	
БрО3Ц7С5Н1	БрОЦСН3-7-5-1	2,5 ... 4,0	6,0 ... 9,5	3,0 ... 6,0	—	0,5 ... 2,0	1,3	
БрО4Ц7С5	БрОЦС3,5-7-5	3,0 ... 5,0	6,0 ... 9,0	4,0 ... 7,0	—	—	1,3	
БрО4Ц4С17	БрОЦС4-4-17	3,5 ... 5,5	2,0 ... 6,0	14,0 ... 20,0	—	—	1,3	
БрО5Ц5С5	БрОЦС5-5-6	4,0 ... 6,0	4,0 ... 6,0	4,0 ... 6,0	—	—	1,3	
БрО5С25	—	4,0 ... 6,0	—	23,0 ... 26,0	—	—	1,2	
БрО6Ц6С3	—	5,0 ... 7,0	5,0 ... 7,0	2,0 ... 4,0	—	—	1,3	
БрО8Ц4	—	7,0 ... 9,0	4,0 ... 6,0	—	—	—	1,0	
БрО10Ф1	—	9,0 ... 11,0	—	—	0,4 ... 1,1	—	1,0 (Pb ≤ 0,3)	
БрО10Ц2	—	9,0 ... 11,0	1,0 ... 3,0	—	—	—	1,0 (Pb ≤ 0,5)	
БрО10С10	—	9,0 ... 11,0	—	8,0 ... 11,0	—	—	0,9	

Примечание. ГОСТ 613—79 введен взамен ГОСТ 613—65.

* Остальное — медь.

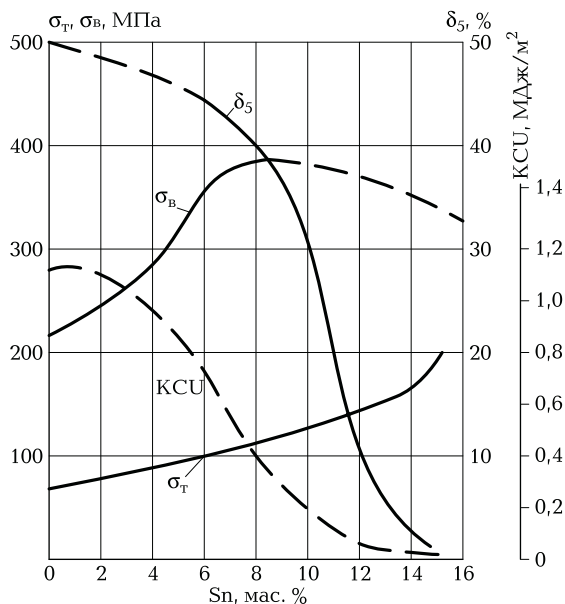


Рис. 2.1. Зависимость механических свойств литых оловянных бронз от содержания олова:

КСЧ — ударная вязкость; остальные обозначения см. на рис. 1.3

Газы и водяной пар. Во влажных газах (особенно в хлоре, хлороводороде, сероводороде) оловянные бронзы, легированные свинцом, нестойки. Устойчивы в сухих газах. В аммиаке нестойки все марки оловянных бронз. В сухом и влажном водяном паре при малых скоростях течения пара устойчивы все марки (потери массы до 0,0025 мм/год). При больших скоростях пара коррозия резко возрастает (до 0,9 мм/год).

Органические соединения. В спиртах, альдегидах, сложных эфирах, нефтяных растворителях стойки все марки оловянных бронз.

Свариваемость. Свариваемость оловянных бронз изменяется в широких пределах в зависимости от их химического состава и наличия вредных примесей.

С увеличением содержания основного легирующего элемента — олова свариваемость бронз ухудшается, поскольку увеличивается склонность к образованию трещин в околошовной зоне. Чтобы получить сварные соединения без трещин, необходимо ограничить содержание олова до 9...10 % и свинца до 0,05 % (для бронзы БрО10Ц2). При этом рекомендуются предварительный отжиг заготовок при температурах 480...530 °С в течение 3 ч, наплавка кромок свариваемых деталей хорошо свариваемой бронзой БрОЦ4-3

или БрОНМц8-1-0,6, что исключает появление трещин даже при сварке в жестком контуре.

Свинец практически нерастворим в оловянной бронзе в твердом состоянии, и при кристаллизации он выделяется как самостоятельная фаза, располагаясь между дендритами. Это резко ухудшает свариваемость бронз, способствуя образованию трещин в ЗТВ сварки. Однако свинец сильно повышает антифрикционные свойства бронз, поэтому он специально вводится в состав оловянных бронз, например: для изготовления подшипников, работающих при высоких удельных давлениях, для облицовок гребных валов в судостроении и других ответственных деталей.

Кроме свинца сильное отрицательное влияние на свариваемость оловянных бронз оказывает легкоплавкий висмут, даже при очень малом его содержании (0,005 %).

Образование трещин при сварке оловянных бронз обусловлено действием ряда факторов:

- нагрев выше 300 °С резко снижает пластичность металла околошовной зоны (рис. 2.2);
- при перегреве избыточное олово, находящееся по границам кристаллов литых бронз, расплавляется, что нарушает связь между ними;
- большой температурный интервал кристаллизации оловянных бронз определяет возможность ликвации олова, что способствует образованию химической неоднородности металла по сечению, а следовательно, неоднородности его механических свойств и появлению кристаллизационных трещин в металле сварных швов;
- сегрегация легкоплавких вредных примесей (свинца и висмута) на границах кристаллов при содержании свинца более 0,05 % и висмута более 0,005 %.

Сильным раскислителем в составе оловянных бронз является фосфор, который образует при сварке легкоплавкую эвтектику $\text{Cu} - \text{Cu}_3\text{P}$ (температура плавления 714 °С). Поэтому фосфором литейные бронзы легируют до 1 %, а деформируемые — до 0,4 % (см. табл. 2.8), так как при содержании фосфора более 0,5 % последние не подвергаются горячей обработке давлением вследствие того, что эвтектика расплавляется, нарушается связь между кристаллитами — и бронза разрушается. Под воздействием термомодеформационного цикла сварки оловянно-фосфорные бронзы, содержащие большое количество фосфидной эвтектики, могут также образовывать трещины и разрушаться.

Для обеспечения технологической прочности сварных соединений (отсутствия трещин в швах и околошовной зоне) из бронз с вы-

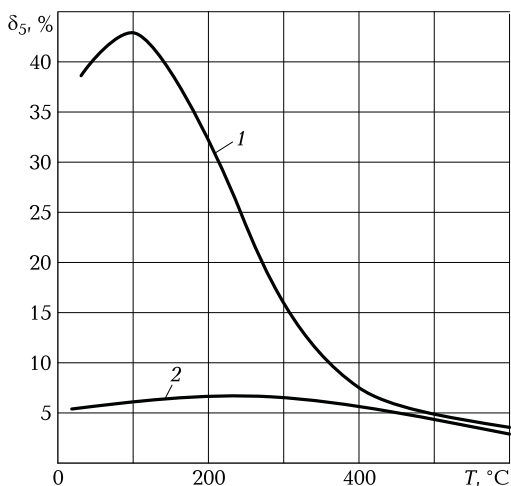


Рис. 2.2. Зависимость пластичности от температуры нагрева T для образцов из бронзы БрО10Ц2:

1 — с малым содержанием эвтектоида (5%); 2 — с высоким содержанием эвтектоида (20%)

соким содержанием олова необходимо применение следующих технологических мер при их сварке:

- использование электродов с более низким содержанием олова, чем в основном металле, или предварительная наплавка кромок такими электродами;
- отжиг заготовок (отливок) перед сваркой;
- подогрев перед сваркой заготовок (отливок) при толщине стенок более 10 мм до температур не более 200... 250 °С;
- сварка (заварка дефектов) на пониженных режимах с охлаждением каждого последующего валика (при многослойной сварке) до температур 100... 200 °С с последующей его проковкой;
- окончательный отжиг сваренного изделия отливки с исправленными дефектами.

2.1.4. Свойства и свариваемость латуней

Свойства. Латунями называются сплавы меди с цинком. Промышленное применение имеют латуни, содержащие до 50 % цинка. По химическому составу их подразделяют на двойные (простые), состоящие из меди и цинка, и многокомпонентные (сложные или специальные).

В зависимости от назначения и механических свойств латуни бывают, так же, как и бронзы, обрабатываемые давлением (ГОСТ 15527—2004 «Сплавы медно-цинковые (латуни), обрабатываемые давлением. Марки») и литейные (ГОСТ 17711—93 «Сплавы медно-цинковые (латуни) литейные. Марки»).

Обозначения марок двойных деформируемых латуней состоят из буквы «Л» (латунь) и цифры, указывающей среднее содержание меди (в процентах по массе) в латуни данной марки. Например, обозначения Л96 и Л63 означают, что эти марки латуни содержат соответственно 96 и 63 % меди, остальное — цинк.

Марки многокомпонентных деформируемых латуней обозначаются аналогично бронзам. После первой буквы «Л» (латунь) указывают буквы обозначений элементов, которыми легирована данная марка латуни. За буквами следует число, показывающее среднее содержание меди (в процентах по массе), а за ним цифры в той же последовательности, что и буквы, соответствующие среднему содержанию каждого легирующего элемента (в процентах по массе).

Содержание цинка в марках латуней, обрабатываемых давлением, не указывают, т. е. цинк — все остальное. Например, обозначение ЛМц58-2 означает, что данная марка латуни содержит 58 % меди, 2 % марганца, остальное — цинк.

Система маркировки литейных латуней по ГОСТ 17711—93 принципиально отличается как от маркировки латуней, обрабатываемых давлением, так и от ранее существовавшей маркировки литейных латуней по ГОСТ 17711—72.

Обозначение марок литейных латуней начинается с букв «ЛЦ», после которых следует число, показывающее среднее содержание цинка в соответствующей марке латуни, а не меди, как это было в ГОСТ 17711—72.

За этим числом следуют буквы и цифры, указывающие среднее содержание каждого легирующего элемента. Например, обозначение ЛЦ38Мц2С2 означает, что в данной марке латуни среднее содержание цинка составляет 38 %, марганца и свинца — по 2 %, остальное — медь.

Химический состав стандартных марок латуней приведен в табл. 2.9, а механические свойства литейных латуней — в табл. 2.10.

Для сопоставления обозначений марок литейных латуней по действующему стандарту (ГОСТ 17711—93) с отмененным (ГОСТ 17711—72) в табл. 2.10 приведена их маркировка по обоим стандартам.

Латуни, содержащие до 10 % цинка, называют томпаками (Л96, Л90), а 10...20 % — полутомпаками (Л85, Л80).

С увеличением содержания цинка существенно изменяются физические свойства латуней (снижается плотность, теплопровод-

Таблица 2.9. Химический состав латуней

Сплав	Марка	Массовая доля, %									
		основных компонентов*									при- месей
		Cu	Pb	Fe	Mn	Al	Sn	Si	Ni	As	
<i>Латуни, обрабатываемые давлением</i>											
Томпак	Л96	95... 97	—	—	—	—	—	—	—	—	0,2
	Л90	88... 91	—	—	—	—	—	—	—	—	0,2
Полутомпак	Л85	84... 86	—	—	—	—	—	—	—	—	0,3
	Л80	79... 81	—	—	—	—	—	—	—	—	0,3
Латунь	Л70	69... 72	—	—	—	—	—	—	—	—	0,2
	Л68	67... 70	—	—	—	—	—	—	—	—	0,3
	Л63	62... 65	—	—	—	—	—	—	—	—	0,5
	Л60	59... 62	—	—	—	—	—	—	—	—	1,0

Латунь алюминиевая	ЛФ77-2	76... 79	—	—	—	1,7... 2,5	—	—	—	—	0,3
Латунь алюминево-железная	ЛАЖ60-1-1	58... 61	—	0,7... 1,5	0,1... 0,6	0,7... 1,5	—	—	—	—	0,7
Латунь алюминево-никелевая	ЛАН59-3-2	57... 60	—	—	—	2,5... 3,5	—	—	2,0... 3,0	—	0,9
Латунь железно-марганцевая	ЛЖМц59-1-1	57... 60	—	0,6... 1,2	0,5... 0,8	0,1... 0,4	0,3... 0,7	—	—	—	0,2
Латунь никелевая	ЛН65-5	64... 67	—	—	—	—	—	—	5,0... 6,5	—	0,3
Латунь марганцевая	ЛМц58-2	57... 60	—	—	1,0... 2,0	—	—	—	—	—	1,2
Латунь марганцево-алюминиевая	ЛМцА57-3-1	55... 58,5	—	—	2,5... 3,5	0,5... 1,5	—	—	—	—	1,3
Томпак оловянный	ЛО90-1	88... 91	—	—	—	—	0,2... 0,7	—	—	—	0,2
Латунь оловянная	ЛО70-1	69... 71	—	—	—	—	1,0... 1,5	—	—	—	0,3
	ЛО62-1	61... 63	—	—	—	—	0,7... 1,1	—	—	—	0,3
	ЛО60-1	59... 61	—	—	—	—	1,0... 1,5	—	—	—	1,0

Сплав	Марка	Массовая доля, %									
		основных компонентов*									при- ме- сей
		Cu	Pb	Fe	Mn	Al	Sn	Si	Ni	As	
Латунь свинцовая	ЛС63-3	62... 65	2,4... 3,0	—	—	—	—	—	—	—	0,2
	ЛС74-3	72... 75	2,4... 3,0	—	—	—	—	—	—	—	0,2
	ЛС64-2	63... 66	1,5... 2,0	—	—	—	—	—	—	—	0,3
	ЛС60-1	59... 61	0,6... 1,0	—	—	—	—	—	—	—	0,5
	ЛС59-1	57... 60	0,8... 1,9	—	—	—	0,3	—	—	—	0,7
	ЛС59-1В	57... 61	0,8... 1,9	—	—	—	—	—	—	—	1,5
Латунь железо- свинцовая	ЛЖС58-1-1	56... 58	0,7... 1,3	0,7... 1,3	—	—	—	—	—	—	0,5
Латунь кремнистая	ЛК80-3	79... 81	—	—	—	—	—	2,5... 4,0	—	—	1,5
Латунь мышьяко- вая	ЛМш68-0,05	67... 70	—	—	—	—	—	—	—	—	0,3

Латунь алюми- ниево-мышьяковая	ЛАМш77-2-0,05	76... 79	—	—	—	1,7... 2,5	—	—	—	—	0,3
Латунь оловянно- мышьяковая	ЛОМш70-1-0,05	69... 71	—	—	—	—	1,0... 1,5	—	—	—	0,3
Латунь алюми- ниево-никель- кремнисто- марганцевая	ЛАНКМц75-2- 2,5-0,5-0,5	73... 76	—	—	0,3... 0,7	1,6... 2,2	—	0,3... 0,7	2,0... 3,0	—	0,5
<i>Латуни литейные</i>											
Латунь свинцовая	ЛЦ40С	57... 61	0,8... 2,0	—	—	—	—	—	—	—	2,0
	ЛЦ40Сд	57... 61	0,8... 2,0	—	—	—	—	—	—	—	1,5
Латунь марганцо- вая	ЛЦ40Мц1,5	57... 60	—	—	1,0... 2,0	—	—	—	—	—	2,0
Латунь марганцово- железная	ЛЦ40Мц3Ж	53... 58	—	0,5... 1,5	3,0... 4,0	—	—	—	—	—	1,7
Латунь марганцово- алюминиевая	ЛЦ40Мц3А	55... 58,5	—	—	2,5... 3,5	0,5... 1,5	—	—	—	—	1,5
Латунь марганцово- свинцовая	ЛЦ38Мц2С2	57... 60	1,5... 2,5	—	1,5... 2,5	—	—	—	—	—	2,2
Латунь алюми- ниевая	ЛЦ30А3	66... 68	—	—	—	2,0... 3,0	—	—	—	—	2,6

Сплав	Марка	Массовая доля, %									
		основных компонентов*									при- ме- сей
		Cu	Pb	Fe	Mn	Al	Sn	Si	Ni	As	
Латунь оловянно-свинцовая	ЛЦ25С2	70... 75	1,0... 3,0	—	—	—	0,5... 1,5	—	—	—	1,5
Латунь алюминие-во-железо-марганцевая	ЛЦ23А6ЖЗМц2	64... 68	—	2,0... 4,0	1,5... 3,0	4,0... 7,0	—	—	—	—	1,8
Латунь кремнистая	ЛЦ16К4	78... 81	—	—	—	—	—	3,0... 4,5	—	—	2,5

* Остальное — цинк.

Таблица 2.10. Механические свойства литейных латуней

Марка латуни		Способ литья	σ_B , МПа	δ_5 , %	НВ
по ГОСТ 17711—80	по ГОСТ 17711—72		не менее		
ЛЦ40С	ЛС59-1Л	П	215	12	70
		К, Ц	215	20	80
ЛЦ40СД	ЛС59-1ЛД	Д	196	6	70
		К	264	18	100
ЛЦ40Мц1,5	ЛМц58-2Л	П	372	20	100
		К, Ц	392	20	110
ЛЦ40Мц3Ж	ЛМцЖ55-3-1	П	441	18	90
		К	490	10	100
		Д	382	10	90
ЛЦ40Мц3А	ЛМцА57-3-1	К, Ц	441	15	115
ЛЦ38Мц2С2	ЛМцС58-2-2	П	245	15	80
		К	343	10	85
ЛЦ30А3	ЛА67-2,5	П	294	12	80
		К	392	15	90
ЛЦ25С2	ЛВОС	П	146	8	60
ЛЦ23А6Ж3Мц2	ЛАЖМц66-6-3-2	П	686	7	160
		К, Ц	705	7	165
ЛЦ16К4	ЛК80-3Л	П	294	15	100
		К	343	15	110

Примечания: 1. П — литье в песчаные формы; К — литье в кокиль; Д — литье под давлением; Ц — центробежное литье.

2. См. примеч. 1 к табл. 1.2, примеч. 2 к табл. 2.3.

ность и электропроводность, а коэффициент линейного расширения увеличивается) (рис. 2.3).

В зависимости от содержания легирующих элементов многокомпонентные латуни подразделяются на алюминиевые (ЛА77-2) марганцовые (ЛМц58-2), свинцовые (ЛС59-1) и др. При содержании в латунях нескольких легирующих элементов их называют со-

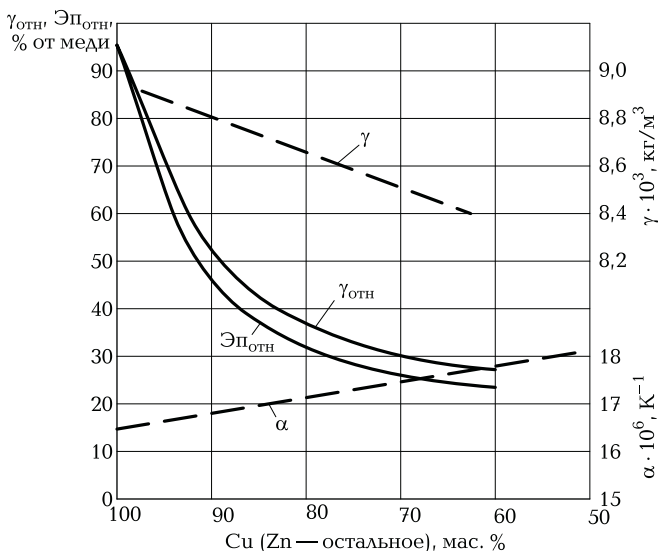


Рис. 2.3. Зависимость физических свойств двойных латуней от содержания цинка Zn:

λ — коэффициент теплопроводности; Эп — электропроводность; α — температурный коэффициент линейного расширения; γ — плотность; $\lambda_{\text{отн}} = \lambda_{\text{латуни}} / \lambda_{\text{меди}}$; $\text{Эп}_{\text{отн}} = \text{Эп}_{\text{латуни}} / \text{Эп}_{\text{меди}}$

ответственно железо-марганцовыми (ЛЖМц59-1-1), алюминиево-никелевыми (ЛАН59-3-2) (см. табл. 2.9).

Латуни обладают высокими механическими и технологическими свойствами, а также коррозионной стойкостью в различных агрессивных средах. Однако каждый легирующий элемент или их сочетание придают специфические отличительные свойства, которые определяют назначение и преимущественную область применения латуней:

- высокой пластичностью в холодном состоянии обладают латуни с высоким содержанием меди, поэтому они используются для изготовления полуфабрикатов холодным прессованием. А латуни с высоким содержанием цинка лучше обрабатываются резанием и противостоят износу без смазки;
- самые высокие антифрикционные свойства имеют свинцовые латуни, что определяет их использование для изготовления подшипников трения;
- оловянные латуни обладают повышенной коррозионной стойкостью в морской воде, поэтому их называют морскими и широко применяют в судостроении. Латуни являются незаменимым

конструкционным материалом для изготовления оборудования, работающего в условиях очень низких отрицательных температур. Например, латунь марки ЛС59-1 при температуре $-256\text{ }^{\circ}\text{C}$ имеет предел прочности при растяжении 490 МПа и относительное удлинение 35 %.

Коррозионная стойкость. Наиболее распространенными видами коррозии латуней являются обесцинкование и коррозионное растрескивание в присутствии влаги, кислорода, аммиака и других газов. Коррозионная стойкость латуней существенно изменяется в зависимости от коррозионной среды.

Атмосферная среда, пресная и морская вода. Латунь стойки в воздушной атмосфере, в том числе морской (скорость коррозии составляет 0,0013... 0,0038 мм/год). В пресной и морской воде также коррозионно-стойки (скорость коррозии в пресной воде составляет 0,0025... 0,25 мм/год, в морской воде — 0,0075... 0,1 мм/год при нормальной температуре), но с повышением температуры скорость коррозии резко увеличивается. В рудничной воде латуни малостойки.

Соли. Фтористые и хлористые соли в воде (хлориды натрия, калия, кальция, магния) оказывают небольшое влияние на скорость коррозии латуней, а йодистые значительно ее увеличивают.

Кислоты. Латунь нестойки и неприменимы в минеральных кислотах (азотной, соляной и серной) в присутствии окислительных солей. В уксусной, фосфорной и жирных кислотах (кроме чистой олеиновой) малостойки, в олеиновой стойки.

Щелочи. В водных растворах едких щелочей, прежде всего в присутствии окислителей ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ и др.), латуни малостойки, так как склонны к коррозионному растрескиванию (особенно марки ЛМц, ЛМцЖ, ЛА, ЛАН).

Органические соединения. Все латуни стойки в бензине, ацетоне, бутиловом, метиловом и этиловом спиртах и фторированных соединениях.

Газы. Латунь проявляют стойкость в сухих газах (фторе, хлоре, фтористом водороде, угольном ангидриде, оксиде углерода, азоте, ацетилене), но в присутствии влаги свыше 70 % стойкость в галогенах резко снижается. В сероводороде стойки латуни с содержанием цинка выше 30 %, а с пониженным содержанием цинка малостойки. В сернистом газе все марки латуней нестойки и неприменимы.

Свариваемость. Двойные латуни, содержащие примерно до 30 % цинка, имеют однофазную структуру α -твердого раствора, что определяет их высокую пластичность и хорошую свариваемость. При дальнейшем повышении содержания цинка двойные латуни приобретают двойную структуру $\alpha + \beta$ или однофазную β . Такие сплавы имеют пониженную пластичность, ограниченную свариваемость и обрабатываются давлением только в горячем состоянии.

Легирование другими элементами (Al, Mn, Si) существенно изменяет структуру, а также механические и теплофизические свойства латуней. С увеличением содержания цинка снижаются теплопроводность и электропроводность латуней, что несколько улучшает их свариваемость, так как при сварке требуется более низкая температура подогрева. Свариваемость улучшается, кроме того, при легировании кремнием, который, образуя с кислородом воздуха тугоплавкую пленку оксида кремния SiO_2 , уменьшает испарение цинка из расплавленного металла. Кремний повышает стойкость против коррозионного растрескивания, к которому склонны латуни, содержащие более 20 % цинка, при эксплуатации изделий в коррозионных средах в условиях растягивающих напряжений.

Остаточные напряжения растяжения способствуют появлению в сварных соединениях коррозионного растрескивания. Эффективным способом его предотвращения является низкотемпературный отжиг при 250...300 °С в течение 1...2 ч, который хотя и не снижает полностью остаточные сварочные напряжения, но достаточен для исключения коррозионного растрескивания и не ухудшает механические свойства латуни. Оптимальным режимом, который снижает остаточные сварочные напряжения, полностью исключает деформацию изделий после механической обработки и не ухудшает при этом механические свойства латунных сварных соединений, является отжиг при температурах 400...500 °С в течение 3 ч. Высокопрочные двухфазные латуни обладают худшей свариваемостью, чем однофазные, поскольку уменьшение в их структуре пластичной α -фазы снижает стойкость против образования трещин в околосварной зоне.

Малый температурный интервал кристаллизации обуславливает высокую склонность латуней к образованию пор в наплавленном металле и сварных швах, а жидкотекучесть ограничивает возможность выполнения швов и наплавов в положениях, отличных от нижнего и наклонного (до 75°). Однако наибольшую трудность при сварке латуней представляет испарение цинка, обладающего низкой температурой кипения (907 °С), близкой к температуре плавления латуней (900...1 000 °С).

При испарении цинк интенсивно окисляется, образуя тугоплавкий пылевидный оксид цинка ZnO , которая создает плотное облако белого цвета, закрывающее видимость сварочной ванны. Это затрудняет выполнение операций, необходимых для формирования сварного шва. Испарение цинка также способствует образованию пор в металле сварных швов и наплавов.

Кроме того, пары и оксид цинка имеют высокую токсичность, что требует особо тщательного применения мер защиты сварщика от отравления (эффективной вентиляции, индивидуальных средств надежной защиты органов дыхания) и технологических мероприя-

тий (ограничения режимов сварки; выполнения швов короткими валиками с перерывами на охлаждение после наложения каждого валика; применения электродов, содержащих кремний в стержнях или покрытиях, который образует тугоплавкие пленки, уменьшающие испарение цинка; использования бронзовых электродов в случаях, где это допустимо вместо латунных). Эти требования существенно снижают возможность применения ручной дуговой сварки для изготовления латунных сварных конструкций. Поэтому более широко дуговая сварка латунными покрытыми электродами применяется для заварки дефектов в латунных отливках, наплавки антифрикционных слоев на стальные детали и для пайкосварки чугуна.

2.1.5. Медно-никелевые сплавы

Свойства. К медно-никелевым сплавам относят сплавы с медной основой, содержащие до 50 % никеля. Никель имеет неограниченную растворимость в меди в твердом состоянии, поэтому двойные медно-никелевые сплавы имеют структуру α -твердого раствора, что определяет их высокую пластичность и хорошую свариваемость при дуговой сварке. Некоторые тройные сплавы (например, нейзильбер МНЦ1-20) тоже имеют структуру твердого раствора никеля и цинка в меди.

Легирующие другими элементами, а также наличие вредных примесей существенно влияют на механические, физико-химические и технологические свойства медно-никелевых сплавов, в том числе и на свариваемость.

Обозначение марок медно-никелевых сплавов (ГОСТ 492—2006 «Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые, обрабатываемые давлением. Марки») аналогично маркировке бронз и латуней, обрабатываемых давлением.

Обозначение марок начинается с буквы «М» (медь — основа сплава), после которой следуют буквы, обозначающие легирующие элементы. За буквами в той же последовательности следуют цифры среднего содержания каждого легирующего элемента данного сплава. Содержание меди в сплаве не указывается, т. е. медь — все остальное. Например, обозначение марки МН19 означает, что данный сплав содержит 19 % никеля, остальное — медь, а обозначение марки МНЖ5-1 означает, что сплав содержит 5 % никеля, 1 % железа, остальное — медь. Все цифры означают среднее содержание соответствующего элемента в процентах по массе.

Следует отметить, что по ГОСТ 492—2006 к медно-никелевым сплавам отнесен также монель-металл, имеющий не медную, а никелевую основу (табл. 2.11). Однако в его маркировке это учтено,

так как на первом месте указана буква «Н» (основа — никель). Так, из обозначения марки НМЖМц28-2,5-1,5 следует, что сплав содержит в среднем по массе 28 % меди, 2,5 % железа, 1,5 % марганца, никель — остальное.

В технической литературе отсутствует единая система разделения медно-никелевых сплавов по свойствам и назначению. Эти сплавы условно разделены на три группы: конструкционные, термоэлектродные и сплавы сопротивления.

В пределах каждой группы медно-никелевые сплавы различаются не только по маркировке, но и по названиям, что облегчает определение их назначения и область применения. Наименования, маркировка и назначение наиболее широко применяемых медно-никелевых сплавов приведены в табл. 2.11.

Коррозионная стойкость. Медно-никелевые сплавы отличаются высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, пресной и морской воде, устойчивы в органических кислотах, сухих газах, щелочах и щелочных растворах солей и органических соединений, нестойки в минеральных кислотах (особенно в азотной). При увеличении влажности и температуры газов (галогенов и угольного ангидрида) коррозионная стойкость медно-никелевых сплавов резко снижается. Для работ в тяжелых условиях — при повышенных температурах, давлениях и скоростях движения пресной и морской воды (например, изготовление конденсатных труб в морском судостроении) — широко применяется мельхиор МНЖМц30-1-1. Он обладает также наиболее высокой коррозионной стойкостью по сравнению с другими медно-никелевыми сплавами против ударной (струевой морской) коррозии при скоростях воды до 2 м/с.

К наиболее стойким медно-никелевым сплавам относится монель-металл, имеющий никелевую основу и легированный медью с небольшими присадками марганца и железа (НМЖМц28-2,5-1,5). Он не корродирует в дистиллированной воде, а в пресной скорость коррозии незначительна даже при аэрации и повышенных температурах. В морской воде скорость коррозии составляет 0,008... 0,25 мм/год.

Монель-металл устойчив в растворах щелочей и нейтральных щелочных и слабокислотных солях угольной, соляной, серной, азотной и уксусной кислот, но быстро корродирует в азотной, азотистой, соляной и серной кислотах.

Монель-металл стоек в сухих газах, но в присутствии влаги корродирует в оксидах азота, галогенах (хлоре, броме, йоде), аммиаке и сернистых соединениях.

Свариваемость. Сплавы сопротивления — манганин (МНМц3-12), константан (МНМц40-1,5) и термоэлектродный сплав копель, изготавливаемые в основном в виде проволоки и лент, свариваются преимущественно аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом.

Таблица 2.11. Химический состав медно-никелевых сплавов

Сплав	Марка	Массовая доля, %							Вид изделия	Область применения
		основных компонентов						при- месей, всего, не более		
		Ni + Co	Al	Fe	Mn	Zn	Cu			
—	МНЖ5-1	5,0... 6,5	—	1,0... 1,4	0,3... 0,8	—	Ост.	0,7	Листы, трубы, прутки	Трубопроводы, детали для электротехники и приборостроения
Мельхиор	МН19	18... 20	—	—	—	—	»	1,5	Ленты, полосы, прутки, трубы	Плакировочный мате- риал для медицинских инструментов, точной механики
	МНЖМц30- 1-1	29... 33	—	0,5... 1,0	0,5... 1,0	—	»	0,6	Полосы, ленты, трубы	Конденсаторные трубы маслоохладителей, трубные доски конди- ционеров в приборо- строении
Нейзиль- бер	МНЦ15-20	13,5... 16,5	—	—	—	18... 22	»	0,9	Полосы, ленты, трубы, прутки, проволока	Пружины реле, детали для электротехники, столовые приборы, ху- дожественные изделия
Куниаль А	МНА13-3	12... 15	2,3... 3,0	—	—	—	»	1,9	Прутки	Изделия повышенной прочности в машино- строении

Сплав	Марка	Массовая доля, %							Вид изделия	Область применения
		основных компонентов						при- месей, всего, не более		
		Ni + Co	Al	Fe	Mn	Zn	Cu			
Куниаль Б	МНА6-1,5	5,5... 6,5	1,2... 1,8	—	—	—	Ост.	1,1	Полосы	Пружины и другие изделия в электротехнической промышленности
Копель	МНМц43-0,5	42,5... 44,0	—	—	0,1... 1,0	—	»	0,6	Проволока	Термопары и компенсационные провода
Константан	МНМц40-1,5	39,0... 41,0	—	—	1,0... 2,0	—	»	0,9	Проволока, полосы, ленты	Компенсационные провода
ТБ	МН16	15,3... 16,3	—	—	—	—	»	0,2	Проволока	То же
Манганин	МНМц3-12	2,5... 3,5	—	—	11,5... 13,5	—	»	0,9	Листы, проволока	Измерительные приборы
Мельхиор	МН25	24...26	—	—	—	—	»	1,3	Листы, полосы, прутки, трубы	Монеты, декоративные изделия

	МНЖМц10-1-1	9,0... 11,0	—	1,0... 2,0	0,3... 1,0	—	»	0,5	Трубы	Конденсаторные трубы, трубные доски конденсаторов
Нейзиль- бер	МНЦ12-24	11...13	—	—	—	Ост.	62... 66	0,6	Листы, профили, трубы, прутки	Корпуса для часов, горячепрессованные детали
	МНЦ18-27	17...19	—	—	—	»	53... 56	0,6		
	МНЦ18-20	17...19	—	—	—	»	60... 64	0,6	Листы, профили, трубы, прутки	Пружины реле, детали, получаемые глубокой вытяжкой, художе- ственные изделия
Манганин	МНМцАЖЗ- 12-0,3-0,3	2,5... 3,5	0,2... 0,4	0,2... 0,5	11,5... 13,5	—	Ост.	0,4	Прово- лока	Компенсационные провода
ТП	МН0,6	0,57... 0,63	—	—	—	—	»	0,1	То же	То же
Монель	МНЖМц28- 2,5-1,5	Ост.	—	2,0... 3,0	1,2... 1,8	—	27... 29	0,6	Листы, полоса, лента, проволока	Детали повышенной коррозионной стой- кости
—	МН95-5	4,4... 5,0	—	—	—	—	Ост.	0,5	Листы, трубы, прутки	Изделия машинострои- тельной промышлен- ности

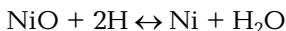
Сплав	Марка	Массовая доля, %							Вид изделия	Область применения
		основных компонентов						при- месей, всего, не более		
		Ni + Co	Al	Fe	Mn	Zn	Cu			
Свинцовый нейзильбер	МНЦС16-29-1,8*	15,0... 16,5	—	—	—	Ост.	51... 55	1,0	Полосы	Изделия часовой промышленности
—	МНЖКТ5-1-0,2-0,2**	5,0... 6,5	—	1,0... 1,4	0,3... 0,8	0,15... 0,30 Si	Ост.	0,7	Проволока	Присадочный металл для сварки, пайки и наплавки

Примечание. См. примеч. к табл. 1.18.

* Содержание свинца 1,6...2,0 %.

** Содержание титана 0,1...0,3 %, кремния 0,15...0,30 %.

Свариваемость двойных медно-никелевых сплавов идентична свариваемости меди, и на образование пор и горячих трещин оказывают влияние те же факторы. Но наличие никеля в медно-никелевых сплавах создает дополнительные факторы, усугубляющие эти процессы. Растворимость водорода в никеле больше, чем в меди, а образующаяся при сварке тугоплавкий оксид никеля NiO с температурой плавления 2 090 °С плохо переводится в шлак и реагирует с водородом:



Поэтому при сварке медно-никелевых сплавов образование паров воды происходит интенсивнее, чем при сварке меди, и при кристаллизации сварочной ванны создаются дополнительные условия, способствующие образованию пор и горячих трещин. Эффективным средством их предотвращения является легирование металла шва элементами-модификаторами (алюминием, титаном, церием и др.), обеспечивающими образование мелкозернистой структуры, наиболее полное раскисление и дегазацию сварочной ванны. Важным условием для исключения появления трещин и пор в швах является жесткое ограничение содержания как в основном металле, так и в электродном вредных примесей, нерастворимых в меди и никеле (висмута, свинца и др.), а также серы.

2.2. НИКЕЛЬ И ЕГО СПЛАВЫ

Свойства. Никель и его сплавы, содержащие более 50 % никеля, — широко распространенные конструкционные материалы, применяемые во многих отраслях промышленности для изготовления аппаратуры и оборудования, работающих в агрессивных средах при повышенных и пониженных температурах.

Никель не окисляется при нагревании до 700... 800 °С и сохраняет высокие пластические свойства как при высоких, так и при низких температурах. Например, относительное удлинение никеля при нормальной температуре составляет 35 %, а при температуре –253 °С равно 48 %. Высокая пластичность позволяет изготавливать из него различные изделия с помощью горячей и холодной деформации.

Более 80 % никеля расходуется на изготовление сплавов, в которых он является основой либо одним из основных легирующих элементов (например, в хромоникелевых аустенитных сталях).

Никель относится к тяжелым металлам ($\gamma = 8,90 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$), т. е. по плотности практически одинаков с медью. Теплопроводность никеля выше, чем у углеродистых и низколегированных сталей: $\gamma = 57,8 \dots 59,9 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ в интервале температур 20... 100 °С. Тепло-

проводность понижается со снижением температуры до точки Кюри (360 °С), а затем с повышением температуры плавно возрастает. Температура плавления никеля в зависимости от его чистоты находится в интервале 1 430 ... 1 455 °С.

Химический состав *первичного никеля* регламентируется ГОСТ 849 — 2008 «Никель первичный. Технические условия». Буква «Н» в обозначении марки соответствует установленному обозначению наименования металла (никель), а последующие цифры являются порядковыми номерами марок, характеризующими чистоту металла, но численно с ней не связанными.

Для никелевого проката используют в основном наиболее чистые марки никеля (с наименьшим содержанием примесей) Н-0, Н-1у, Н-1, которые применяются для изготовления химического оборудования, цистерн для транспортировки щелочей, различных химических реагентов и пищевых продуктов.

Химический состав никеля и никелевых сплавов, *обрабатываемых давлением*, регламентируется ГОСТ 492 — 2006 «Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые, обрабатываемые давлением. Марки». Механические свойства в зависимости от термического состояния и вида деформации приведены в табл. 2.12.

Никель, обрабатываемый давлением, называется *полуфабрикатным*, поэтому в обозначения марок кроме буквы «Н» введена

Таблица 2.12. Механические свойства никеля при температуре 20 °С

Состояние металла	σ_r , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	НВ
Чистый никель (отожженный)	—	280 ... 300	40 ... 50	—
Никель литой	140 ... 210	350 ... 420	20 ... 30	60 ... 80
Никель кованный	280 ... 330	540 ... 610	31 ... 37	127 ... 158
Никель отожженный	190 ... 240	500 ... 550	42 ... 44	90 ... 110
<i>Листы</i>				
Холоднокатаные	590 ... 740	630 ... 770	1 ... 2	130 ... 160
Отожженные	100 ... 180	420 ... 530	35 ... 45	90 ... 100
<i>Проволока</i>				
Холоднокатаная	590 ... 740	670 ... 770	—	—
Отожженная	140 ... 210	450 ... 530	—	—

Примечание. См. примеч. 1 к табл. 1.2, примеч. 2 к табл. 1.6, примеч. 2 к табл. 2.3.

буква «П». То есть в отличие от первичного никеля марки деформируемого обозначаются НП1, НП2 и т. д. Кроме того, для анодного никеля в обозначение включена буква «А» (анодный) — НПА1, НПА2.

Обозначения марок никелевых сплавов аналогичны маркировке бронз, латуней и медно-никелевых сплавов и состоят из букв, обозначающих основу сплава (Н), и букв наименований легирующих элементов, за которыми следуют цифры, соответствующие среднему содержанию легирующего элемента в процентах по массе. Например, марка сплава НМц5 означает, что он содержит в среднем 5 % марганца, остальное — никель, а марка сплава НМцАК2-2-1 означает, что он содержит в среднем 2 % марганца, 2 % алюминия и 1 % кремния, остальное — никель. Содержание никеля в марках не указывается.

Коррозионная стойкость. Никель в различных средах имеет следующие характеристики коррозионной стойкости.

Атмосфера, пресная и морская вода. В атмосферных условиях никель обладает высокой коррозионной стойкостью, но в промышленных районах, где в воздухе содержится сероводород и сернистый газ, скорость коррозии увеличивается (до 0,004 мм/год, вместо 0,00018 мм/год в сельской местности).

В пресной воде никель устойчив даже при наличии соединений серы, но при содержании в воде ионов хлора и углекислого газа может возникать точечная коррозия. Возможна также коррозия никеля в кислых шахтных водах, содержащих ионы трехвалентного железа и двухвалентной меди.

В морской воде никель достаточно устойчив (скорость коррозии в среднем составляет 0,13 мм/год).

Щелочи и соли. Никель — один из лучших материалов по коррозионной стойкости в щелочных средах, например в NaOH и KOH. При 50%-ной концентрации NaOH (по массе) скорость коррозии даже при повышенных температурах составляет 0,003 мм/год. При плавлении щелочей применяют чистый никель (отожженный малоуглеродистый). Однако в присутствии серы возникает МКК никеля. Нейтральные растворы солей (нитраты, карбонаты, сульфаты, хлориды и др.) незначительно влияют на никель даже при нагревании. Но в кислых растворах солей, особенно хлорида железа и меди, никель сильно корродирует (до 1 мм/год).

Кислоты. В органических жирных кислотах (олеиновой, стеариновой) никель стоек даже при повышенных температурах, но корродирует в уксусной и муравьиной кислотах, особенно при аэрации.

В серной и соляной кислотах скорость коррозии никеля существенно зависит от их концентрации и температуры. В серной кислоте максимальная коррозия достигается при 5%-ной концентрации и постепенно снижается при увеличении концентрации до

80 %. В соляной кислоте минимальная скорость коррозии наблюдается при 5...6%-ной концентрации, а с дальнейшим ее увеличением скорость резко возрастает. В фосфорной, азотной и азотистой кислотах никель нестойк.

Газы. Сухие газы — галогены, аммиак, сернистый газ, оксид азота при нормальной температуре не оказывают коррозионного воздействия на никель, но при наличии влаги коррозия возникает. Чистый никель не склонен к коррозионному растрескиванию.

Сера. Большим химическим сродством к никелю обладает сера, образуя с ним сульфид никеля Ni_3S_2 , который получается, если с никелем контактируют материалы, содержащие даже небольшое количество серы (масло, жиры, краски, горючие материалы). Глубина и скорость проникновения серы в никель зависят от температуры и заметно проявляются выше 400 °С.

При содержании серы в никеле более 0,005 % резко снижается его пластичность. Наиболее сильно снижаются пластичность и прочность никеля при переходе контактирующей активной среды (эвтектический сплав никеля с серой) в жидкое состояние. При этом относительное понижение пластичности никеля при температуре 700 °С достигает 80 %, а прочности — 60 %.

При длительном хранении на поверхности никеля образуется налет, содержащий серу, который не удаляется при обезжиривании. Поэтому при сварке никеля кромки и прилегающая к ним поверхность свариваемых элементов тщательно зачищают механическим способом с последующим обезжириванием ацетоном, уайт-спиритом или чистым бензином.

Свариваемость. Расширению использования никеля в различных отраслях промышленности в значительной мере способствовала разработка сварочных материалов и технологии сварки дугowymi способами. Дуговая сварка никеля и его сплавов покрытыми электродами разработана относительно недавно, что обусловлено трудностью получения сварных швов с необходимой технологической прочностью, без пор и горячих трещин.

Пористость сварных швов вызывается большой склонностью расплавленного никеля к газонасыщению и резким уменьшением растворимости ряда газов в никеле при его кристаллизации. При расплавлении никеля сварочной дугой растворимость азота возрастает почти в 60 раз по сравнению с его растворимостью при обычном расплавлении никеля. При кристаллизации сварочной ванны азот интенсивно выделяется из пересыщенного твердого раствора, образуя поры в швах.

Легирующие элементы — титан, кремний, марганец и углерод — оказывают различное влияние на растворимость азота в жидком никелевом сплаве и его склонность к пористости. При легировании одним элементом в количестве до 1,5 % повышается стойкость про-

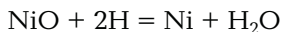
тив образования пор. При этом наибольшую стойкость при минимальном легировании металла шва обеспечивает титан.

Расплавленный никель при 1 720 °С способен растворить 1,18 % кислорода, а в момент кристаллизации его растворимость уменьшается в 20 раз (при температуре 1 470 °С никель растворяет всего 0,06 % кислорода). Избыточный кислород окисляет никель до оксида никеля:



Растворимость водорода в расплавленном никеле значительно ниже, чем кислорода. При температуре 1 700 °С она составляет 31,2 см³/100 г, что в 1,9 раза больше, чем в твердом никеле. Условия растворения водорода при дуговой сварке весьма благоприятны вследствие значительной степени его диссоциации в столбе дуги.

Водород, содержащийся в никеле, восстанавливает NiO, а образующиеся при этом пары воды вызывают пористость и микротрещины, т. е. никель аналогично меди подвержен водородной болезни:



Водород благодаря своей высокой диффузионной активности проникает в зародыши пузырьков азота, интенсивно развивает их и способствует ускоренному удалению азота из жидкого металла, что повышает стойкость никелевых швов против пор, образуемых азотом.

Горячие трещины при сварке никеля — результат появления легкоплавкой эвтектики Ni—Ni₃S₂, имеющей температуру плавления 645 °С, которая располагается при кристаллизации по границам зерен, ослабляет связь между ними, вызывая краснотомкость.

Сварка никеля затрудняется также тем, что образующиеся окислы плохо шлакуются. Эффективным способом повышения технологической прочности никеля при дуговой сварке является его рафинирование с помощью электронно-лучевого перепада. Стойкость против образования горячих трещин рафинированного электронно-лучевым перепадом никеля повышается по сравнению с чистым никелем НП2А примерно в 5 раз.

2.3. АЛЮМИНИЙ И АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Свойства. Алюминий — пластичный, хладостойкий и легкий металл ($\gamma = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) с высокой электропроводностью (65 % от электропроводности меди) и теплопроводностью ($\gamma = 210 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$). Химически активен и коррозионно-стойк в ряде агрессивных сред благодаря образующейся на поверхности изделий пленке оксида Al₂O₃.

По объемам производства и масштабам использования алюминий превосходит все другие цветные металлы. Он распространен как основной конструкционный материал в самолетостроении, судостроении, электротехнической промышленности, производстве химической аппаратуры, строительстве, общем и пищевом машиностроении и т.д. Специфическое свойство алюминия — способность поглощать нейтроны — определило возможность его применения в атомных реакторах. Алюминиевые сплавы используются также в аэрокосмической технике благодаря способности к криогенному упрочнению, т.е. увеличению прочности и пластичности с понижением температуры.

Химический состав и маркировка первичного алюминия (в чушках, слитках, катанке) регламентируются ГОСТ 11069—2001 «Алюминий первичный. Марки» (табл. 2.13). В зависимости от допускаемого количества примесей алюминий подразделяется на три группы: особой, высокой и технической чистоты.

Обозначение марок первичного алюминия состоит из буквы «А» (алюминий) и цифр, соответствующих требуемому содержанию алюминия в данной марке сверх 99 % (дробная часть числа). Например, обозначения марок А999, А95 и А5 означают, что минимальное содержание алюминия в них составляет соответственно 99,999; 99,95 и 99,5 (таким образом, содержание примесей не более 0,001; 0,05 и 0,5 %).

Марки с дополнительным индексом «Е» (А5Е, А7Е) применяются при производстве кабелей, токопроводящих изделий, шин и т.д. Содержание железа в этих марках должно быть не менее 0,18 %, а сумма всех примесей — не более 0,5 %.

Чистый алюминий имеет небольшую прочность ($\sigma_b \leq 100$ МПа), поэтому используется для изготовления малонагруженных изделий, к которым предъявляются в основном требования по коррозионной стойкости, хладостойкости и другим свойствам. Тяжелонагруженные изделия, к которым предъявляются высокие требования по прочностным характеристикам, изготавливаются из алюминиевых сплавов.

Получению мелкозернистой структуры полуфабрикатов алюминиевых сплавов способствуют модификаторы, роль которых выполняют добавки титана, циркония и бора. Эффект модифицирования при введении титана увеличивается с повышением содержания железа. При малом содержании железа титан хотя и измельчает литую структуру, но практически не оказывает воздействия на величину зерна реформированного и отожженного алюминия.

Алюминий и его сплавы подразделяют на две основные группы: деформируемые (прессованные, катаные и кованные) и литейные, используемые в виде отливок. Деформируемые сплавы имеют концентрацию легирующих элементов меньше предела растворимости

Таблица 2.13. Химический состав первичного алюминия

Марка алюминия	Массовая доля, %		Область применения
	Al, не менее	примесей, всего, не более	
<i>Алюминий особой чистоты</i>			Особая химическая аппаратура, электрические конденсаторы для исследовательских и других специальных целей
A999	99,999	0,001	
<i>Алюминий высокой чистоты</i>			
A995	99,995	0,005	
A99	99,99	0,010	
A97	99,97	0,03	
A95	99,95	0,05	
<i>Алюминий технической чистоты</i>			Электролитические конденсаторы, химическая аппаратура для исследовательских и других специальных целей
A85	99,85	0,15	
A8	99,80	0,20	
A7	99,70	0,30	Кабельные и токопроводящие изделия, фольга, алюминиевые сплавы специального назначения
A7E	99,70	0,30*	
A6	99,60	0,40	
A5E	99,50	0,50*	Токопроводящие изделия, алюминиевые сплавы, фольга, лакировка и посуда для варки пищи
A5	99,50	0,50	
A0	99,00	1,0	Токопроводящие изделия, посуда, различные сплавы и специальные лигатуры
A	99,00	1,0	

* Суммарное содержание титана, ванадия, марганца, хрома не более 0,01 %.

и при нагреве могут приобретать однофазное состояние, что обеспечивает их высокую деформационную способность. Литейные сплавы имеют концентрацию легирующих элементов выше предела растворимости и содержат в структуре эвтектику, что придает им хорошие литейные свойства (жидкотекучесть, заполняемость формы), но ухудшает их деформационную способность. Деформируемые сплавы, в свою очередь, подразделяют на термически неупрочняемые (к которым относится также алюминий всех групп чистоты) и термически упрочняемые. Термически неупрочняемыми являются

ся сплавы алюминия с марганцем и магнием (Al—Mn, Al—Mg), а термически упрочняемыми — сплавы алюминия с медью, цинком и другими элементами.

Литейные сплавы легированы значительным количеством кремния либо меди или совместно этими элементами.

Химический состав деформируемого алюминия и его сплавов регламентируется ГОСТ 4784—97 «Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки» (табл. 2.14).

В зависимости от количества допускаемых примесей деформируемый алюминий бывает высокой чистоты и технической чистоты. Обозначение марок деформируемого алюминия состоит из букв «АД» или букв «АД» с цифрами (АД000, АД00, АД0 и АД1), которые характеризуют степень его чистоты, но количественно величину допускаемых примесей не отражают. Наиболее чистым является технический алюминий марки АД000 (общее количество примесей не более 0,2 %), а наименее чистым — марки АД (примесей не более 1,2 %).

Обозначение марок деформируемых алюминиевых сплавов не имеет единой четкой системы маркировки (см. табл. 2.14).

Сплавы алюминия, легированные марганцем и магнием (термически неупрочняемые) маркируются так же, как это принято для бронз и медно-никелевых сплавов, т. е. обозначение марок состоит из первоначальных букв русских названий элементов, составляющих сплав. За буквами следуют цифры, соответствующие среднему содержанию основного легирующего элемента. Например, обозначения АМг1, АМг3, АМг5 означают, что в этих марках алюминий-магниевых сплавов среднее содержание магния составляет 1; 3 и 5 %. Марки сплавов алюминия, легированные медью и магнием, обозначают только буквой «Д» (дюралю), как это установлено для обозначения меди в марках легированных сталей. За буквами следуют цифры (например, Д1, Д16, Д18), которые не связаны с количеством меди в сплавах и являются просто порядковыми номерами. Эти сплавы термически упрочняемые. Имеются также другие условные обозначения марок деформируемых алюминиевых сплавов, состоящие из букв и цифр, не связанных с химическим составом или другими свойствами сплавов (ММ, АК, В65 и др.).

Для обозначения марок деформируемого алюминия и его сплавов ГОСТ 4784—97 предусматривает цифровую систему, в которой каждой марке присвоен четырехзначный номер. Например, для алюминия марки АД — номер 1015, для сплавов марок АМц, АМг3, Д1 соответственно номера 1400, 1110 и т. д. (см. табл. 2.14).

В зависимости от состояния поставки деформируемых алюминиевых сплавов принята следующая дополнительная их маркировка (ГОСТ 21631—76 «Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия»): Н — нагартованные, Н2 — полунагартован-

Таблица 2.14. Химический состав деформируемого алюминия и алюминиевых сплавов

Обозначение марки		Массовая доля, %									
		основных элементов									прочих примесей, всего, не более
буквен- ное	цифро- вое	Al, не менее	Cu	Mg	Mn	Zn	Fe	Si	Ni	Li	
<i>Алюминий высокой чистоты</i>											
АДоч	—	99,98	0,003	—	—	0,003	0,005	—	—	—	0,02
АДч	—	99,95	0,015	—	—	0,005	0,030	—	—	—	0,05
<i>Алюминий технической чистоты</i>											
АД000	—	99,80	0,02	—	—	0,05	0,15	0,15	—	—	0,20
АД00	1010	99,70	0,015	0,02	0,02	0,07	0,16	0,16	—	—	0,30
АД00Е	—	99,70	0,01	—	—	0,05	0,20	0,08	—	—	0,30
АД0	1011	99,50	0,02	0,03	0,025	0,07	0,30	0,30	—	—	0,50
АД0Е	—	99,50	0,05	—	—	0,07	0,40	0,30	—	—	0,50
АД1	1013	99,30	0,05	0,05	0,025	0,10	0,30	0,30	—	—	0,70
АДС	—	99,0	0,10	—	—	0,10	0,60	0,50	—	—	1,0
АД	1015	99,80	0,10	0,10	0,10	0,10	0,50	0,50	—	—	1,2

Обозначение марки		Массовая доля, %									
		основных элементов									прочих примесей, всего, не более
буквенное	цифровое	Al, не менее	Cu	Mg	Mn	Zn	Fe	Si	Ni	Li	
<i>Алюминиевые сплавы</i>											
ММ	1403	Ост.	0,2	0,2...0,5	1,0...1,4	0,1	0,6	1,0	—	—	0,2
АМц	1400	»	0,1	0,2	1,0...1,6	0,1	0,7	0,6	—	—	0,1
Д12	1521	»	0,1	0,8...1,2	1,0...1,5	0,1	0,7	0,7	—	—	0,1
АМг1	1510	»	0,1	0,7...1,6	0,2	—	0,10	0,10	—	—	0,1
АМг2	1520	»	0,1	1,8...2,6	0,2...0,6	0,2	0,4	0,4	—	—	0,1
АМг3	1530	»	0,1	3,2...3,8	0,3...0,6	0,2	0,5	0,5...0,8	—	—	0,1
АМг4	1540	»	0,1	3,8...4,5	0,5...0,8	0,2	0,4	0,4	—	—	0,1
АМг4,5	—	»	0,1	4,0...4,9	0,4...1,0	0,2	0,4	0,4	—	—	0,15
АМг5	1550	»	0,1	4,8...5,8	0,3...0,8	0,2	0,5	0,5	—	—	0,1
АМг6	1560	»	0,1	5,8...6,8	0,5...0,8	0,2	0,4	0,4	—	—	0,1
АД31	1310	»	0,1	0,4...0,9	0,1	0,2	0,5	0,3...0,7	—	—	0,1
АД33	1330	»	0,15...0,4	0,8...1,2	0,15	0,25	0,7	0,4...0,8	—	—	0,15

АД35	1350	»	0,1	0,8...1,4	0,5...0,9	0,2	0,5	0,8...1,2	—	—	0,1
AB	1340	»	0,1 ... 0,5	0,45... 0,90	0,15... 0,35	0,2	0,5	0,5...1,2	—	—	0,1
Д1	1110	»	3,8... 4,8	0,4...0,8	0,4...0,8	0,3	0,7	0,7	0,1	—	0,1
Д16	1160	»	3,8... 4,9	1,2...1,8	0,3...0,9	0,3	0,5	0,5	0,1	—	0,1
B65	1165	»	3,9... 4,5	0,15... 0,30	0,3...0,5	0,1	0,2	0,25	—	—	0,1
Д18	1180	»	2,2... 3,0	0,2...0,5	0,2	0,1	0,5	0,5	—	—	0,1
AK6	1360	»	1,8... 2,6	0,4...0,8	0,4...0,8	0,3	0,7	0,7...1,2	0,1	—	0,1
AK8	1380	»	3,9... 4,8	0,4...0,8	0,4...1,0	0,3	0,7	0,6...1,2	0,1	—	0,1
AK4	1140	»	1,9... 2,5	1,4...1,8	0,2	0,3	0,8... 1,3	0,5...1,2	0,8... 1,3	—	0,1
AK4-1	1141	»	1,9... 2,7	1,2...2,8	0,2	0,3	0,8... 1,4	0,35	0,8... 1,4	—	0,1
—	1915	»	0,1	1,3...1,8	0,2...0,6	3,4... 4,0	0,4	0,3	—	—	0,1

Обозначение марки		Массовая доля, %									
		основных элементов									прочих примесей, всего, не более
буквенное	цифровое	Al, не менее	Cu	Mg	Mn	Zn	Fe	Si	Ni	Li	
—	1925С	Ост.	0,1	0,8... 1,4	0,2... 0,5	4,3... 5,5	0,4	0,4	—	—	0,15
—	1925	»	0,8	1,3... 1,8	0,2... 0,7	3,4... 4,0	0,7	0,7	—	—	0,1
В95	1950	»	1,4... 2,0	1,8... 2,8	0,2... 0,6	5,0... 7,0	0,5	0,5	0,1	—	0,1
АЦПл	—	»	—	—	0,025	0,9... 1,3	0,3	0,3	—	—	0,1
—	1420	»	0,005... 0,2	4,0... 6,0	—	—	—	—	—	1,3... 2,2	0,1
—	1424	»	—	4,7... 5,1	0,1... 0,25	0,4... 0,7	0,01... 0,15	—	—	1,5... 1,8	0,1
—	1440	»	1,2... 1,9	0,6... 1,1	0,05... 0,08	—	0,2	0,15	—	1,6... 2,3	0,1
—	1441	»	1,6... 1,9	0,7... 1,1	0,01... 0,4	—	—	—	0,02... 0,1	0,7... 1,1	0,1

—	1450	»	2,8... 3,2	0,05...0,1	0,05... 0,08	—	0,2	0,15	—	1,8... 2,0	0,1
—	1460	»	2,6... 3,3	0,05...0,1	0,05... 0,1	—	0,2	0,15	—	1,9... 2,3	0,1
—	1461	»	2,8... 3,5	0,1...0,6	0,1... 0,5	0,4... 0,8	—	—	0,02... 0,08	1,5... 1,8	0,1
—	1464	»	3,0... 3,2	0,4...0,7	0,2... 0,4	—	—	—	—	0,4... 0,7	0,1
—	1469	»	3,2... 4,5	0,01...0,5	0,003...0,5	—	—	—	—	1,0... 1,7	0,1

Примечание. См. примеч. к табл. 1.18.

ные, М — отожженные, Т — закаленные и естественно состаренные, Т1 — закаленные и искусственно состаренные.

Сплавы без термической обработки не имеют дополнительных условных обозначений.

Термически упрочняемые деформируемые сплавы подразделяют по системам легирования на шесть групп:

- дуралюмины — сплавы системы Al—Cu—Mg (Д1, Д16, Д18, ВАД1, ВД17, М40);
- авиали — сплавы системы Al—Mg—Si и Al—Cu—Mg—Si (АВ, АД31, АД33, АД35, АК6, АК6-1, АК8);
- сплавы системы Al—Cu—Mg—Fe—Ni (АК2, АК4, АК4-1);
- сплавы системы Al—Cu—Mn (Д20, Д21) и системы Al—Cu—Mn—Li—Cd (ВАД23);
- сплавы системы Al—Zn—Mg—Cu (В93, В94, В95, В96);
- сплавы системы Al—Mg—Zn (В92, В92Ц, АЦМ).

Из перечисленных сплавов к свариваемым относятся все марки алюминия высокой и технической чистоты (АД0, АД1 и др.), термически не упрочняемые сплавы (АМц, АМг1 — АМг6), термически упрочняемые (АВ, АД31, АД33, АД35, М40, Д20, ВАД1, В92Ц).

Следует отметить, что термически упрочняемые сплавы сваривают преимущественно аргонодуговой сваркой неплавящимися и плавящимися электродами. Химический состав и обозначение марок литейных алюминиевых сплавов регламентируются ГОСТ 1583—93 «Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия» (табл. 2.15). По системам легирования литейные алюминиевые сплавы подразделяют на пять групп: Al—Si—Mg; Al—Si—Cu; Al—Cu; Al—Mg; Al — прочие компоненты.

Маркировка литейных алюминиевых сплавов по ГОСТ 1583—93 не имеет единой системы обозначений.

Наименования состоят из букв «АЛ» (алюминиевый литейный) и цифровых порядковых номеров (АЛ4, АЛ25, АЛ29). Наряду с этим в ГОСТ 1583—93 для ряда сплавов сохранена маркировка, принятая по другим стандартам и техническим условиям. Некоторые марки алюминиевых сплавов обозначают первыми буквами названий основных легирующих элементов и цифрами, характеризующими среднее их содержание в сплаве. Например, марки АК5М7, АК6М2 означают, что данные сплавы содержат соответственно 5 и 6 % кремния, а также 7 и 2 % меди, остальное — алюминий.

Некоторые марки обозначают буквами и цифрами, которые не характеризуют количественное содержание легирующих элементов (например, ВКЖЛС2, ВАЛ-10 и др.). Кроме стандартных алюминиевых сплавов (см. табл. 2.14 и 2.15) в промышленности широко применяют нестандартные сплавы с повышенными механически-

ми и технологическими свойствами, изготавливаемые по ТУ и ОСТ.

Коррозионная стойкость. Стойкость алюминия и его сплавов обусловлена защитным действием оксидной пленки Al_2O_3 , поэтому коррозионно-агрессивными являются только среды, способные разрушать эту пленку. Алюминий и однофазные алюминиевые сплавы более стойки по сравнению с двухфазными и многофазными сплавами. Коррозионные свойства алюминия и его сплавов имеют в различных агрессивных средах следующие характеристики.

Атмосфера, пресная и морская вода. В промышленной атмосфере алюминий и его сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью. Чистый алюминий АД и сплавы АМг и АМц могут применяться в морской воде и тропических условиях. В незагрязненной морской воде стойки алюминий и алюминиевые сплавы, не содержащие меди. В пресной воде алюминий практически не корродирует даже при высокой температуре (до $180^\circ C$), но при наличии примесей щелочей, солей меди, ртути или ионов хлора коррозионная стойкость снижается. Кислые рудничные воды также коррозионно агрессивны по отношению к алюминию.

Щелочи и соли. В растворах едких щелочей, солей меди, ртути, хромата калия и сульфатов (сульфата алюминия, железных и цинковых квасцов и др.) алюминий и алюминиевые сплавы нестойки. Однако в растворе аммиака они проявляют стойкость, особенно сплавы, легированные магнием.

Кислоты. Неорганические кислоты (соляная, серная, сернистая, азотная, фосфорная, плавиковая) оказывают сильное коррозионное воздействие на алюминий и его сплавы, но это воздействие в большой степени зависит от концентрации и температуры реагента. Серная и азотная кислоты при 100%-ной концентрации и нормальной температуре практически не оказывают влияния на алюминий.

Растворы вызывают сильную коррозию, так же, как и разбавленные соляная и плавиковая кислоты. Слабые растворы фосфорной кислоты (до 1 %), хромовой (до 10 %) и борной (при всех концентрациях) мало агрессивны.

Органические кислоты (уксусная, лимонная, глюконовая, молочная, яблочная) оказывают слабое коррозионное воздействие, щавелевая и муравьиная — достаточно сильное.

Газы. В среде оксида углерода, азота, доменного и дымовых газов алюминий и его сплавы коррозионно-устойчивы.

Органические вещества и продукты питания. Хорошее сопротивление коррозии оказывают алюминий и его сплавы в средах нейтральных жиров, масел, углеводов (сахаре, целлюлозе), фруктовых соков, пива, алкоголя, мыла, парафина, воска, стеарина, бензина, бензола.

Таблица 2.15. Химический состав литейных алюминиевых сплавов

Группа сплавов	Марка сплава	Массовая доля, %								
		основных компонентов *							примесей, всего, не более	
		Mg	Si	Mn	Cu	Ti	Ni	Cd	З, В	Д
1. Сплавы на основе Al—Mg—Si	АЛ2	—	10 ... 13	—	—	—	—	—	2,1	2,7
	АК-9	0,2...0,4	8... 11	0,2... 0,5	—	—	—	—	2,6	3,0
	АЛ4	0,17 ... 0,3	8 ... 10,5	0,2... 0,5	—	—	—	—	1,1	1,5
	АЛ4-1	0,23 ... 0,3	9 ... 10,5	0,2... 0,35	—	0,08 ... 0,15	—	—	0,6	0,6
	АЛ34	0,35 ... 0,55	6,5... 8,5	—	—	0,1 ... 0,3	0,15... 0,4 Be	—	1,0	—
	АК-7	0,2...0,5	6 ... 8	0,2... 0,6	—	—	—	—	3,1	3,3
	АЛ9	0,2...0,4	6... 8	—	—	—	—	—	1,1	2,0
	АЛ9-1	0,25 ... 0,4	7 ... 8	—	—	0,08 ... 0,15	—	—	0,6	0,8
	АК10Сy	0,1 ... 0,5	9... 11	0,3... 0,6	—	—	0,1 ... 0,25 Sb	—	—	4,8

2. Сплавы на основе Al—Si—Cu	АЛ5	0,35... 0,6	4,5... 5,5	—	1... 1,5	—	—	—	1,0	1,7
	АЛ5-1	0,4... 0,55	4,5... 5,5	—	1... 1,5	0,08... 0,15	—	—	0,6	0,8
	АК5М2	0,2... 0,8	4...6	0,2... 0,8	1,5... 3,5	0,05... 0,2	—	—	2,8	3,0
	АК5М7	0,2... 0,5	4,5... 6,5	—	6... 8	—	—	—	2,7	3,0
	АК6М2	0,3... 0,45	5,5... 6,5	—	1,8... 2,3	0,1... 0,2	—	—	0,7	—
	АЛ32	0,3... 0,5	7,5... 9	0,3... 0,5	1... 1,5	0,1... 0,3	—	—	0,9	1,1
	АК5М4	0,2... 0,5	3,5... 6	0,2... 0,6	3... 5	0,05... 0,2	—	—	2,8	3,2
	АК8М3	—	7,5... 10	—	2... 4,5	—	—	—	—	4,2
	ВАЛ8	0,2... 0,45	7... 8,5	0,5... 1 Zn	2,5... 3,5	0,1... 0,25	0,05... 0,1 В; 0,05... 0,25 Ве	—	0,6	0,6
	АК9М2	0,2... 0,8	7,5...10	0,1... 0,4	0,5...2	0,05... 0,2	—	—	—	2,8

Группа сплавов	Марка сплава	Массовая доля, %								
		основных компонентов*							примесей, всего, не более	
									Способы литья	
		Mg	Si	Mn	Cu	Ti	Ni	Cd	З, В	Д
Сплавы на основе Al—Si—Cu	AK11M2	—	11 ... 13	—	1,8... 2,5	0,6... 1,0 Fe	—	—	—	2,2
	АЛ30	0,8...1,3	11 ... 13	—	0,8... 1,5	—	0,8... 1,3	—	—	0,5
	АЛ25	0,8...1,3	11 ... 13	0,3... 0,6	1,5... 3,0	0,05... 0,2	0,8... 1,3	—	—	1,3
	ВКЖЛС2	0,2...0,5	20...22	0,2... 0,4	2,2... 3,0	0,1... 0,3	2,2... 2,8; 0,2... 0,4 Cr	—	—	1,1
3. Сплавы на основе Al—Cu	АЛ19	—	—	0,6... 1,0	4,5... 5,3	0,15... 0,35	—	—	0,9	—
	ВАЛ10	—	—	0,35... 0,8	4,5... 5,1	0,15... 0,35	—	0,07 ... 0,35	0,6	—
4. Сплавы на основе Al—Mg	АМг4К1,5М1	4,5...5.2	1,3... 1,7	0,6... 0,9	0,7... 1,0	0,10... 0,25	0,002... 0,004 Be	—	—	0,5

	АЛ13	4,5...5,5	4,5... 5,5	0,8... 1,3	0,1... 0,4	—	—	—	0,6	1,8
	АЛ28	4,8...6,3	—	0,4... 1,0	—	0,05... 0,15	—	—	0,5	0,7
	АЛ23	6...7	0,05... 0,2 Zr	0,02... 0,1 Be	—	—	—	—	0,5	—
	АЛ23-1	6...7	0,05... 0,2 Zr	0,02... 0,1 Be	—	0,05... 0,15	—	—	0,2	—
	АЛ27	9,5... 10,5	0,05... 0,2 Zr	0,05... 0,15	—	0,05... 0,15	—	—	0,5	0,5
	АЛ22	10,5...13	0,8... 1,2	—	—	0,05... 0,15	0,003... 0,007 Be	—	0,6	1,3
	АЛ29	6...8	0,5...1	0,25... 0,6	—	—	—	—	—	1
5. Сплавы, содержа- щие Al и прочие компонен- ты	АЛ11	0,1...0,3	6...8	7... 12 Zn	—	—	—	—	1,7	2,5
	АК9Ц6р	0,3...0,5	8...10	0,1... 0,6	0,3... 1,5	5... 7 Zn	0,3... 1 Fe	—	—	0,6
	АЛ24	1,5...2	0,2... 0,5 Cr	0,2... 0,5	3,5... 4,5 Zn	0,1... 0,2	—	—	0,9	—

Примечание. В — листы по выплавляемым моделям; К — литье в кокиль; Д — литье под давлением; З — литье в песчаные формы.

* Остальное — алюминий.

Свариваемость. В сварных конструкциях алюминий и его сплавы используются в виде листов, профилей, труб, поковок, штамповок, прессованных прутков и проволоки. Сварно-литые конструкции являются редким исключением, и в отливках сварка применяется, как правило, для заварки дефектов.

Главной проблемой, определяющей свариваемость алюминия и сплавов на его основе, является очень большая химическая активность взаимодействия алюминия с кислородом атмосферы, вследствие чего на поверхности расплавленного металла образуется плотная и тугоплавкая пленка Al_2O_3 (температура плавления $2050^\circ C$). Эта пленка препятствует сплавлению наплавленного металла с основным и между валиками при многослойной сварке, а также образует шлаковые включения в сварных швах. Высокое химическое сродство алюминия с кислородом исключает возможность удаления пленки в процессе сварки путем раскисления алюминия, поэтому необходимо применение других способов ее разрушения и удаления.

Перед сваркой требуется особо тщательная подготовка поверхности свариваемых кромок и прилегающих к ним зон шириной 25...30 мм путем обезжиривания (ацетоном, уайт-спиритом, бензином, тетрахлорметаном). Не следует применять для обезжиривания деталей трихлорэтилен и дихлорэтан, которые при взаимодействии с выделяющимся в процессе сварки озоном образуют фосген — очень токсичное удушающее вещество.

Дуговая сварка вблизи хлорированных растворителей, используемых для обезжиривания, может привести к образованию весьма токсичных выделений в результате воздействия на растворитель (или его паров) ультрафиолетового излучения. Поэтому не следует обезжиривать металл, когда вблизи горит дуга, а хлорированные растворители необходимо хранить в закрытой таре вдали от зоны сварки.

Поверхностную оксидную пленку после обезжиривания алюминия удаляют механическим способом (шабером или стальной проволочной щеткой, изготовленной из нагартованной проволоки диаметром не более 0,3 мм марки 12Х18Н10Т или любой другой кислотостойкой стали).

При серийном производстве пленку удаляют химическим травлением в водном растворе едкого натра (50 г/л) при температурах 60...70 °С в течение 1...2 мин, промывают в горячей воде при температуре не ниже 50 °С, затем в холодной.

Для химической очистки основного металла и проволоки рекомендуется раствор следующего состава, г/л: едкий натр — 8...12; кальцинированная сода — 40...50; тринатрийфосфат — 40...50.

Общая щелочность травильного раствора свежеприготовленной ванны должна составлять 2...5%. Травление производится при тем-

пературах раствора 60... 70 °С в течение 5... 20 мин с последующей промывкой в горячей, а затем в холодной воде.

После промывки поверхность осветляют в растворе хромового ангидрида (100 г/л) и серной кислоты плотностью $1,84 \cdot 10^3$ кг/м³ при температурах 15... 25 °С до полного исчезновения темного налета.

После осветления обязательна промывка деталей в холодной, а затем в горячей проточной воде температурой выше 50 °С и сушка сжатым воздухом (60... 80 °С), очищенным от влаги и масла.

Отрицательное влияние на свариваемость алюминия и его сплавов оказывает их высокая склонность к пористости.

Основными причинами образования пор в швах считаются высокая растворимость водорода в расплавленном металле и ее резкое скачкообразное снижение при кристаллизации расплава, а также медленное выделение газов при охлаждении сварочной ванны.

Максимальная растворимость водорода в алюминии, которая наблюдается при температурах, характерных для дуговой сварки, достигает 20,9 см³/100 г при 2 025 °С. При температуре 850 °С и давлении, равном 0,1 МПа, растворимость водорода снижается до 2,15 см³/100 г, а при температуре 650 °С (ниже температуры плавления алюминия) она уменьшается в 60 раз. Такое резкое снижение растворимости приводит к образованию пор в швах, так как водород не успевает выделяться и остается в виде газовых пузырьков в твердом металле. Создающееся в них большое давление способствует образованию кристаллизационных трещин в сварных швах (особенно в термически упрочняемых сплавах).

Водород при сварке алюминия и его сплавов покрытыми электродами появляется из влаги, адсорбированной покрытиями электродов. При всех способах дуговой сварки алюминия и его сплавов основным источником водорода, повышающим его содержание в сварочной ванне до опасных концентраций, является влага, адсорбированная поверхностью основного и электродного металла и содержащаяся в гидратированной оксидной пленке. Исключить влияние этих источников водорода на образование пор в сварных швах можно с помощью следующих технологических мероприятий:

- свариваемые детали подвергают травлению в растворе ортофосфорной кислоты или едкого натра;
- электроды хранят в герметичной упаковке и дополнительно прокаливают непосредственно перед сваркой;
- обезводороженные детали и проволоку перед сваркой хранят не более 3 сут;
- не производят сварку на интенсивно охлаждаемых медных подкладках, имеющих на поверхности адсорбированную влагу;

- перед сваркой применяют подогрев деталей, что увеличивает время пребывания сварочной ванны в жидком состоянии и способствует более полной дегазации металла;
- технологией плавки и рафинирования ограничивается содержание водорода следующими максимальными пределами, обеспечивающими необходимое качество полуфабрикатов, см³/100 г: в алюминии — 0,22; в сплавах АД31, АВ — 0,30; АМг6 — 0,65. Для получения сварных швов без пор при сварке сплава АМг6 необходимо, чтобы содержание водорода в основном металле составляло не более 0,4 см³/100 г.

Предложены новые промышленные методы рафинирования, обеспечивающие снижение указанной концентрации водорода в алюминиевых сплавах почти в 2 раза.

Установлено, что в общем объеме газовыделения доля водорода составляет не более 25 % и зависит от марки и способов получения сплава. Основным источником металлургической пористости являются углеводородные соединения, которые диссоциируют в зоне дуги на углерод и водород. Углеводородная гипотеза позволяет объяснить причину появления черного налета (сажи) в околошовной зоне на поверхности металла при гелиево-дуговой сварке, что ранее объяснялось нарушением газовой защиты и повышенной влажностью газа.

Кроме того, алюминий активно взаимодействует с азотом, образуя нитриды. Но при сварке этого не происходит вследствие наличия в атмосфере кислорода, с которым алюминий реагирует в первую очередь, образуя оксиды. Нитриды образуются только при отсутствии кислорода в атмосфере, контактирующей с расплавленным металлом. Следовательно, склонность к пористости алюминия и его сплавов при сварке пропорциональна их общему газосодержанию (водорода и углеводородов), зависящему от способов выплавки слитков и изготовления полуфабрикатов.

На свариваемость алюминия и его сплавов и свойства сварных соединений большое влияние оказывает наличие в них примесей. Прежде всего это относится к железу и кремнию, которые содержатся во всех промышленных сплавах (см. табл. 2.14). При этом важное значение имеет не только количество, но и их соотношение, которое влияет на сопротивление образованию трещин, а также на механические и коррозионные свойства сварных соединений. При этом должно выполняться условие $Fe : Si > 1$.

Все марки технического алюминия по допусжаемому ГОСТ 4784 — 97 содержанию в них кремния и железа (см. табл. 2.14) являются фактически сплавами системы Al—Si—Fe. При соблюдении в их составе требуемого соотношения железа к кремнию они хорошо свариваются, без образования трещин.

Влияние кремния на свариваемость алюминия и алюминиевых сплавов определяется тем, что он входит в состав легкоплавкой эвтектики в виде одной из фаз или вступает в химические соединения, являющиеся фазой эвтектики. Положительное влияние железа обусловлено тем, что оно связывает кремний и другие элементы в интерметаллиды. В результате этого исчезает полностью или частично свободный кремний, и легкоплавкая эвтектика не образуется или образуется в очень малом количестве, которое не оказывает влияния на снижение прочности и деформационной способности кристаллизующегося металла. Установлено, что при содержании в алюминиевом сплаве кремния до 0,3 % кристаллизационные трещины не образуются при соотношении $Fe : Si > 0,5$, а при более высокой концентрации кремния в сплаве необходимо, чтобы выполнялось условие $Fe : Si > 1$.

При этом следует учитывать, что на образование горячих трещин в сварных соединениях из деформированных алюминиевых сплавов большое влияние оказывает наследственность полуфабрикатов, т. е. приобретенные в процессе их изготовления особенности строения (наличие металлических и неметаллических примесей, расслоения, размеры, форма и расположение зерен).

Сплавы системы Al—Mn (АМц, АМцС), содержащие 1,0...1,6 % марганца, также относятся к хорошо свариваемым, так как образующаяся в процессе их кристаллизации эвтектика Al—Mn тугоплавка, а при содержании железа более 0,2 % и соотношении $Fe : Si > 1$ склонность к образованию горячих трещин снижается до нуля. Эти сплавы термически не упрочняются и имеют относительно невысокие прочностные свойства.

Листы из сплава АМц, как и листы из алюминия, занимают ведущее место по широте применения среди других полуфабрикатов. Термической обработкой листы из сплава АМц не упрочняются. Холодной деформацией можно повысить прочностные характеристики в 2—3 раза. При этом резко снижается пластичность листов.

С увеличением в технически чистом алюминии содержания железа и кремния до 0,28...2,68 % (при выполнении соотношения $Fe : Si > 2$) коррозионная стойкость основного металла и сварных соединений в кипящей 50%-ной азотной кислоте снижается в 1,6—2,4 раза.

Сварные соединения из алюминия высокой чистоты стойки против МКК, которая появляется в сварных швах при суммарном содержании железа и кремния 0,06...0,5 % (при одинаковом количестве железа и кремния). Превышение концентрации кремния над железом усиливает склонность к МКК металла шва.

При обратном соотношении $Fe : Si = (1,5...2,5) : 1$, когда железа больше, чем кремния, склонность к МКК снижается.

Сплавы двойной системы Al—Mg (AMg1—AMg6) термически также не упрочняются, но при содержании магния более 5 % (AMg5, AMg6) имеют высокие прочностные свойства и относительно небольшую склонность к образованию горячих трещин при сварке. Среди таких сплавов наибольшей склонностью к образованию горячих трещин обладает сплав AMg2.

Механические свойства сплавов системы Al—Mg определяются содержанием магния и марганца. Каждый 1 % магния увеличивает предел прочности на 30... 35 МПа, каждые 0,1 % марганца — на 5... 7 МПа. На предел текучести магний и марганец влияют в значительно меньшей степени.

Поскольку сплавы системы Al—Mg относятся к термически неупрочняемым, полуфабрикаты из них выпускают в отожженном и нагартованном состояниях. Отожженные полуфабрикаты обладают хорошей свариваемостью, имеют удовлетворительные прочностные свойства, высокие пластические характеристики и коррозионную стойкость. Прочностные характеристики сплавов системы Al—Mg повышают путем нагартовки полуфабрикатов.

Алюминиевые сплавы АД31, АД33, АД35 и АВ относятся к системе Al—Mg—Si и известны под названием *авиали*. Примеси железа до 0,3 % существенно не отражаются на механических свойствах сплавов. Повышение содержания железа до 0,7 % приводит к заметному снижению механических характеристик сплавов системы Al—Mg—Si из-за образования интерметаллидных фаз типа AlSiFe, AlFeMnSi, AlMnSi.

Медь и марганец, входящие в состав авиалей, понижают растворимость в сплаве основных элементов и примесей, что приводит к повышению количества легкоплавких эвтектик. Для измельчения литой структуры сплавов в их состав вводят титан, который является модификатором.

Сплавы системы Al—Mg—Si упрочняются термической обработкой в результате выделения фазы Mg₂Si. Коррозионная стойкость авиалей достаточно высокая, они не склонны к коррозионному растрескиванию под напряжением.

Вследствие высокой пластичности в горячем состоянии из сплавов системы Al—Mg—Si изготавливают прессованные полуфабрикаты самой сложной конфигурации. Более равномерная макроструктура и высокие механические свойства по сечению полуфабрикатов получаются при повышении содержания в сплавах марганца. Прессованные полуфабрикаты упрочняются как при естественном, так и искусственном старении. Искусственное старение обеспечивает наиболее высокий уровень их механических свойств. Все промышленные сплавы системы Al—Mg—Si можно обрабатывать по единому режиму термической обработки: температура нагрева под закалку — 520... 530 °С, температура искусственного старения —

160...170 °С, время выдержки при старении — 10...12 ч. В случае перерыва между закалкой и искусственным старением более 1 ч происходит существенное снижение прочностных свойств, особенно предела текучести.

В сварных конструкциях достаточно широко применяется легкий коррозионно-стойкий сплав 1420 системы Al—Mg—Li в виде листов, штамповок и пресованных панелей. При этом значительное снижение склонности к образованию трещин в зоне сплавления и основном металле, а также к образованию пор в швах достигнуто за счет оптимизации химического состава сплава 1420 по суммарному содержанию магния и лития (не более 7,5 %), натрия (0,0015 %) и количеству избыточных фаз, в которые входят кальций и барий (не более 1,4 %), а помимо того, ограничением содержания примесей железа и кремния (соотношением не менее 1,4), водорода (не более 0,4 см³/100 г).

Высокопрочные сплавы системы Al—Si—Mg (AB, АК6, АК8 — см. табл. 2.14) упрочняют при искусственном старении за счет выделения фазы Mg₂Si, поэтому они идентичны сплавам типа дюралюминия. Эти сплавы склонны при сварке к образованию горячих трещин, но при их модифицировании титаном (0,1...0,15 %) могут использоваться для изготовления несложных сварных конструкций.

Сплавы системы Al—Cu—Mg (Д1, Д16) имеют высокую прочность после искусственного старения, а также высокую склонность к образованию горячих трещин при сварке. При содержании меди в сплаве Д1 на минимальном уровне (см. табл. 2.14) и легировании его титаном (до 0,1 % массы) свариваемость улучшается. Склонность сплава Д16 к образованию горячих трещин уменьшается при снижении в нем содержания железа или увеличении кремния и введении титана, что повышает количество легкоплавкой эвтектики на границах зерен, способствуя заполнению («залечиванию») трещин расплавом под действием гидростатического давления и капиллярных сил. Свариваемость сплава Д16 и механические свойства сварных соединений улучшаются при суммарном содержании кремния и железа до 0,1 % и выполнении соотношения Fe : Si > 1.

Алюминиевые сплавы Д16, В65, ВД17, Д18, Д19 относятся к системе Al—Cu—Mg и называются дуралюминами. В качестве легирующего элемента в дуралюмины введен марганец для нейтрализации вредного влияния железа, повышения коррозионной стойкости и некоторого упрочнения. Примеси железа и кремния нежелательны, поэтому предельное их содержание ограничивается 0,5 %. Более благоприятно соотношение, при котором железа больше, чем кремния.

Дуралюмины представляют собой многокомпонентные сплавы со сложным фазовым составом. Железо, кремний, а также марга-

нец, входящие в состав твердого раствора, находятся в связанном состоянии в виде химических соединений и практически не оказывают воздействия на процессы фазовых превращений. Поэтому структура этих сплавов описывается в основном тройной диаграммой системы Al—Cu—Mg.

Главный недостаток алюминиевых сплавов, содержащих в качестве легирующего элемента медь, — пониженная коррозионная стойкость. Последнюю можно регулировать изменением режимов термической обработки. Для получения высокой коррозионной стойкости дуралюминов в естественно состаренном состоянии используют большие скорости охлаждения при закалке. Коррозионная стойкость дуралюминов повышается в искусственно состаренном состоянии и в меньшей мере зависит от скорости охлаждения при закалке.

Сложнолегируемый сплав системы Al—Cu—Mg—Zn (В95) относится к наиболее высокопрочным сплавам, упрочняемым старением, и обладает высокой склонностью к образованию горячих трещин при сварке. Одной из причин особенно высокой к горячеломкости этого сплава является наличие широкого эффективного интервала кристаллизации.

Установлено, что сплав типа В95 состава 2,8...3,0 % магния, 1,4...2,0 % меди, 6...7 % цинка, до 0,2 % марганца и кремния (каждого), 0,2...0,25 % хрома, до 0,5 % железа, до 0,1 % титана, Al — остальное, имеет пониженную склонность к образованию горячих трещин. Для восстановления высоких прочностных свойств сварных соединений из сплава В95 необходима длительная гомогенизация.

Применение сплавов типа Д16, АК8 и В95 для изготовления сварных конструкций весьма ограничено. Свариваемость алюминия и его сплавов исследовалась с использованием различных качественных и количественных технологических проб. Однако оценки склонности к образованию горячих трещин, полученные при испытаниях на различных пробах, дали неоднозначные результаты.

При испытании на крестовой пробе сплавы располагаются по коэффициенту усиления склонности к образованию горячих трещин при сварке в следующем порядке: АМц, АМг3, Д20, М40, АМг6, АВ, Д16, В95, а по результатам испытаний по пробе на трещинообразование — в другой последовательности: АМг3, Д20, М40, АМг6, АМц, Д16, В95, АВ.

Из приведенных результатов следует, что по крестовой пробе наибольшей стойкостью против образования горячих трещин обладает сплав АМц, а по пробе «рыбий скелет» этот сплав превосходит только плохо сваривающиеся сплавы Д16 и В95, что противоречит производственному опыту, так как сплав АМц широко используется для изготовления сварных конструкций общего назначения и характеризуется как хорошо сваривающийся.

При испытании склонности алюминиевых сплавов к образованию горячих трещин по методике МГТУ им. Н.Э.Баумана (по критической скорости деформации) она увеличивается в последовательности: АМг3, АМг6, М40, Д20, АМц, АВ, Д16, В95, а по представленным ранее данным в таком порядке: 1420, 1201, АМг6, АМц, АД31, Д19, Д16. Из приведенных результатов следует, что стойкость низколегированного и малопрочного сплава АМц оценивается ниже, чем высоколегированного и высокопрочного сплава АМг6, что также не согласуется с производственной практикой.

Следует отметить, что проведенные испытания статической трещиностойкости сплавов трех систем: Al—Mg (АМг6), Al—Cu—Mn (сплав 1201), Al—Mg—Li (сплав 1420) — и сварных соединений из этих сплавов, выполненных на цилиндрических образцах с U-образным надрезом, показали, что сплав АМг6 имеет наименьшую трещиностойкость как вдоль, так и поперек проката. Однако термический цикл сварки снижает уровень трещиностойкости околошовной зоны термически упрочняемых сплавов 1201 и 1420 на 30...40 %, а нагартованного сплава АМг6 только на 10...15 %. Это преимущество термически неупрочняемых сплавов следует учитывать при выборе материалов для изготовления несущих сварных конструкций с тяжелым режимом работы.

В сварных корпусных конструкциях широко применяется сплав АМг61, который практически не склонен к пористости благодаря присадке бериллия и обладает хорошей свариваемостью.

Необходимо также учитывать, что термически упрочняемые самозакаливающиеся сплавы системы Al—Zn—Mg склонны при сварке к образованию не только горячих, но и холодных трещин (задержанному разрушению, появляющемуся через некоторое время после сварки). Для предотвращения образования холодных трещин применяется «перестаривание» сварных соединений (нагрев до 200...220 °С), при котором происходят частичное выделение и коагуляция интерметаллидных фаз из твердого раствора и снижение сварочных и структурных напряжений.

Сплавы системы Al—Cu—Li—Cd высокопрочные и жаропрочные, обладают высокими прочностными свойствами как при комнатной, так и при повышенных (до 225 °С) температурах. Типичный представитель сплавов этой системы — ВАД23. Прочность его на 3...5 % ниже, а модуль упругости на 5...8 % выше, чем у сплава Д16. Коррозионная стойкость неплакированного сплава ВАД23 близка к коррозионной стойкости неплакированного сплава Д16. Кроме того, сплав ВАД23 не склонен к коррозии под напряжением и к МКК.

Присутствие лития в сплавах системы Al—Cu—Li—Cd обуславливает прирост прочности, в первую очередь вследствие повышения эффекта искусственного старения. В меньшей мере прирост

прочности связан с эффектом закалки. Наибольший эффект искусственного старения достигается при содержании лития в пределах 0,8...1,5%. При ином содержании лития эффект искусственного старения заметно снижается.

Медь в сплавах системы Al—Cu—Li—Cd обеспечивает значительное повышение предела прочности и длительной прочности. При увеличении количества меди в сплаве величина относительного удлинения несколько снижается, особенно в искусственно составленном состоянии.

Добавки марганца в сплав системы Al—Cu—Li—Cd придают ему высокую прочность при комнатной температуре в сочетании с высокой жаропрочностью. При этом обычная коррозионная стойкость не зависит от содержания меди и лития. Старение сплавов при температуре 165 °С в течение 16 ч обеспечивает высокую стойкость против коррозии под напряжением и МКК. Марганец в сплавах системы Al—Cu—Li—Cd при всех видах термической обработки, за исключением отжига, обеспечивает одновременный рост прочности и пластичности. Максимальное значение предела прочности наблюдается при 1,0% Mn ($\sigma_b = 620$ МПа), а наибольшая пластичность обеспечивается при содержании марганца 0,3...0,6%.

Марганец в сплавах системы Al—Cu—Li—Cd образует пересыщенные твердые растворы, при распаде которых в процессе термической обработки выделяются мелкие марганцовистые фазы размером в десятые доли микрометра. Последние тормозят процесс рекристаллизации и обеспечивают тем самым формирование мелкозернистой структуры. При укрупнении зерен наблюдается одновременное заметное снижение прочности и пластичности сплавов.

Кадмий, входящий в состав сплава ВАД23, не образует интерметаллидных включений. При нагреве под закалку он растворяется в твердом растворе и при последующем искусственном старении обеспечивает более интенсивное протекание процесса упрочнения. Кадмий в сплаве ВАД23 благоприятствует повышению жаропрочности. При этом эффективность добавки кадмия увеличивается при снижении температуры.

Титан в сплаве ВАД23 в небольших количествах существенно не влияет на механические свойства при комнатной и повышенных температурах при кратковременном растяжении, но заметно повышает длительную прочность. Примеси железа и кремния в сплаве ВАД23 снижают прочностные характеристики как при комнатной, так и при повышенной температуре.

Алюминиевые сплавы типа 1911, 1915, 1935, относящиеся к системе Al—Zn—Mg, обладают способностью закаливаться на воздухе, имеют высокие прочностные свойства при комнатной и криогенных температурах, удовлетворительную свариваемость, хорошую общую коррозионную стойкость. Недостатки сплавов системы

Al—Zn—Mg: возникновение процесса разупрочнения при повышении температуры и склонность к коррозии под напряжением. Степень проявления недостатков определяется содержанием цинка и магния, количеством легирующих добавок и структурным состоянием.

Механические свойства сплавов системы Al—Zn—Mg зависят главным образом от суммарного содержания цинка и магния. С его повышением возрастают прочностные характеристики сплавов. Суммарное содержание цинка и магния в сплаве 1911 не превышает 6,5 %, в сплаве 1915 — 5,8 %, в сплаве 1935 — 5,2 %, что совместно с добавками переходных металлов (Mn, Zr, Cr) при определенной технологии изготовления полуфабрикатов и их термической обработке обеспечивает устойчивость этих сплавов против коррозии под напряжением. Стоит отметить, что добавки переходных металлов предназначены в первую очередь для повышения стойкости сплавов против коррозии под напряжением. Помимо этого переходные металлы повышают температуру рекристаллизации, улучшают свариваемость и механические свойства сплавов.

Раздельное или совместное легирование сплавов системы Al—Zn—Mg небольшими количествами марганца, циркония и хрома ускоряет распад твердого раствора, увеличивает количество выпавших частиц, повышает их дисперсность и равномерность распределения.

Введение в сплавы системы Al—Zn—Mg меди приводит к повышению склонности к горячим трещинам, снижению стойкости против общей коррозии и повышению устойчивости против коррозии под напряжением. В связи с этим содержание меди в сплавах 1911, 1915 и 1935 не превышает 0,1 ... 0,2 %. При указанном содержании меди повышение склонности к образованию горячих трещин и снижение общей коррозионной стойкости незначительны, а повышение стойкости сплавов против коррозии под напряжением очень существенно.

Важным достоинством сплавов системы Al—Zn—Mg является их высокая деформируемость при обработке давлением и в особенности при прессовании. Повышенная деформируемость обусловлена тем, что сплавы имеют приблизительно гомогенную структуру твердого раствора с незначительной величиной упругих искажений кристаллической решетки и, соответственно, незначительным деформирующим напряжением.

Благодаря повышенной деформируемости сплавы системы Al—Zn—Mg высокотехнологичны, из них изготавливают преимущественно прессованные полуфабрикаты. Такие полуфабрикаты, имеющие толщину стенки до 10 ... 12 мм, закаляют от температуры прессования на воздухе. При этом вследствие высокой устойчивости твердого раствора достигается фиксация в нем цинка и магния. Высокая устойчивость твердого раствора цинка и магния в

алюминии обусловлена их большой совместной растворимостью. Производят также закалку полуфабрикатов из печи в воду. Температура нагрева под закалку составляет (450 ± 10) °С. Время выдержки при температуре закалки зависит от толщины полуфабрикатов.

Естественное старение сплавов 1911, 1915, 1935 длительное. Независимо от условий закалки (на прессе или из печи в воду) упрочнение сплавов, вызванное естественным старением, наблюдалось в течение всего времени исследования (10 — 15 лет). Основной прирост прочности происходит в первые месяцы старения. Пластичность сплавов при этом уменьшается на малую величину, оставаясь на высоком уровне.

Искусственное старение сплавов системы Al—Zn—Mg осуществляют по ступенчатым режимам. При искусственном старении повышается устойчивость против расслаивающей коррозии и коррозии под напряжением, стабилизируются структура и механические свойства полуфабрикатов. Применение нашли два режима искусственного старения: 1) первая ступень старения при 100 °С в течение 24 ч и вторая ступень при 150 °С в течение 10 ч; 2) первая ступень старения при 100 °С в течение 24 ч и вторая ступень при 175 °С в течение 4 ч. Первый режим позволяет повысить уровень прочности, второй — уровень устойчивости против коррозии под напряжением и расслаивающей коррозии при несколько пониженной прочности.

Алюминиевые сплавы Д20, Д21 и 1201, относящиеся к системе Al—Cu—Mn, обладают повышенной пластичностью, жаропрочностью, работоспособностью в условиях глубокого холода, стойкостью против коррозионного растрескивания. Сплавы характеризуются хорошей свариваемостью, имеют высокие механические свойства в широком интервале температур — от -253 до $+300$ °С.

Отличие в химическом составе сплавов Д20 и Д21 заключается в дополнительном легировании последнего магнием в количестве 0,25... 0,45 %. Сплав 1201 отличается от Д20 тем, что он дополнительно легирован ванадием и цирконием, а также тем, что в нем ограничено содержание примеси магния (0,02 вместо 0,05 %, как у Д20). Указанные отличия в химическом составе обуславливают его лучшую свариваемость. Поэтому сплав 1201 рекомендуется использовать в сварных конструкциях, работающих при повышенных и криогенных температурах.

Основное влияние на характеристики пластичности и вязкости разрушения сплава 1201 оказывает медь. При повышении концентрации меди в пределах, допустимых стандартом, прочностные характеристики сплава 1201 при комнатной и повышенной температурах существенно не изменяются, а вязкость разрушения и пластичность заметно снижаются вследствие увеличения объемной доли избыточных фаз.

Изменение содержания железа в пределах 0,05...0,3 % не сильно отражается на уровне прочностных свойств и пластичности сплава 1201 при комнатной и повышенной температурах. В то же время повышение концентрации железа и кремния приводит к снижению стойкости против образования горячих трещин.

Марганец и титан в сплавах системы Al—Cu—Mn улучшают их технологичность и обеспечивают дополнительное упрочнение сплавов. Содержание марганца и циркония на максимально допустимом уровне благоприятствует получению мелкозернистой структуры полуфабрикатов из сплава 1201.

Листы из сплава 1201 в процессе вылеживания при комнатной температуре после закалки практически не упрочняются. Искусственное старение обеспечивает значительный рост предела текучести (на 80...100 МПа), незначительное повышение предела прочности (на 20...30 МПа) и приводит к снижению удлинения (на 8...10 %). Деформация после закалки ускоряет процесс искусственного старения, благоприятствует более равномерному распаду твердого раствора при старении с выделением однородных дисперсных частиц большой плотности, что повышает прочностные свойства и коррозионную стойкость материала.

2.4. МАГНИЙ И МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Свойства. Из группы легких металлов магний обладает наименьшей плотностью ($\gamma = 1,74 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$), т. е. почти в 1,5 раза легче алюминия, малопрочен (85...130 МПа в литом состоянии и 250 МПа в деформированном), а также малопластичен (3...6 и 8...10 % соответственно). Магний имеет более высокую химическую активность, чем алюминий, и одновременно низкую коррозионную стойкость во многих средах. Это объясняется тем, что образующаяся на поверхности пленка оксида магния MgO, рыхлая и гигроскопичная, удерживает много влаги и не защищает металл от воздействия коррозионно-активных сред, как это свойственно пленке оксида алюминия. Поэтому для защиты магния и его сплавов от коррозии на поверхность деталей обычно наносят плотные оксидные пленки или специальные лакокрасочные покрытия.

В чистом виде магний как конструкционный материал используется ограниченно, но широко применяется как упрочняющий легирующий элемент при изготовлении термически неупрочняемых алюминиевых сплавов, а также находит применение в виде сплавов с другими элементами (Mn, Zn, Al, Zr) в авиационной и автомобильной промышленности.

Химический состав и маркировка первичного магния регламентируются ГОСТ 804—93 «Магний первичный в чушках. Техниче-

ские условия». Принятая система маркировки первичного магния аналогична системе маркировки первичного алюминия.

Обозначение марок первичного магния состоит из букв «Mg» и цифр, соответствующих требуемому содержанию магния сверх 99 % (дробная часть числа). Например, минимально допустимое содержание магния в марках Mg96, Mg95 и Mg90 составляет соответственно 99,96; 99,95 и 99,90 %, а содержание примесей — не более 0,04; 0,05 и 0,10 %.

Наиболее распространенными легирующими элементами, упрочняющими твердый раствор магниевых сплавов, являются алюминий и цинк. Примеси никеля, меди, железа, калия и натрия отрицательно влияют на свойства магния и его сплавов, поэтому жестко нормируются по ГОСТ 14957—76 «Сплавы магниевые деформируемые. Марки».

Магниевые сплавы подразделяют на деформируемые (ГОСТ 14957—76) и литейные (ГОСТ 2856—79 «Сплавы магниевые литейные. Марки»), которые, в свою очередь, делятся на две основные группы: термически неупрочняемые и упрочняемые термической обработкой.

Обозначение марок деформируемых магниевых сплавов состоит из букв «МА» и цифр, не связанных с их химическим составом (порядковые номера сплавов). По ГОСТ 14957—76 регламентируется химический состав 16 марок магниевых сплавов (табл. 2.16).

По системам легирования магниевые сплавы подразделяют на три группы, имеющие наибольшее распространение:

- 1-я группа — сплавы системы Mg—Mn, которые термически не упрочняются и удовлетворительно свариваются (МА1, МА-8 и др.);
- 2-я группа — сплавы системы Mg—Al—Zn, которые содержат до 9 % Al, отличаются более высокой прочностью и технологичностью, термически не упрочняются и хорошо свариваются (МА2, МА2-1, МА2-1 п. ч.);
- 3-я группа — сплавы системы Mg—Zn—Zr, которые упрочняются термической обработкой (старение при температуре 160... 170 °С в течение 24 ч), имеют высокую механическую прочность и плохо свариваются (МА-14 (ВМ65-1)).

Кроме основных трех групп сплавов имеются также сплавы других систем легирования: Mg—Th—Mn (сплав МА13, отличающийся жаропрочностью); Mg—Al—Cd—Ag (сплав МА10 — высокопрочный) и др.

Обозначение марок литейных магниевых сплавов состоит из букв «МЛ» (магниевый литейный) и порядковых номеров сплавов, не связанных с их химическим составом: МЛ2 (Mg—Mn), МЛ3—

МЛ6, МЛ7-1 (Mg—Al—Zn), МЛ10 (Mg—Nd—Zn), МЛ12 (Mn—Zn—Zr) и др.

Свариваемость. Высокая химическая активность взаимодействия магния с кислородом атмосферы отрицательно влияет на его свариваемость. При сварке плавлением магния и его сплавов на поверхности расплавленного металла образуется тугоплавкая пленка оксида магния (температура плавления $2\ 800\ ^\circ\text{C}$) плотностью $3,65 \cdot 10^3\ \text{кг/м}^3$. Эта пленка препятствует сплавлению основного металла с расплавленным (и между валиками при многослойной сварке) и аналогично пленке оксида алюминия не может быть удалена раскислением в процессе сварки. Поэтому требуются механические или физико-химические способы ее устранения, что усложняет процесс сварки и затрудняет возможность получения качественного сварного соединения.

При сварке магний взаимодействует также с другими газами атмосферы. С азотом он образует нитриды Mg_3N_2 , которые снижают механические свойства и коррозионную стойкость сплавов, так как нитриды служат очагами коррозии.

Особо неблагоприятное влияние на свариваемость оказывает водород, который интенсивно растворяется в жидком металле при высоких температурах, и при кристаллизации в процессе охлаждения вследствие резкого снижения растворимости водорода образуются поры.

В процессе кристаллизации магний и его сплавы, не содержащие модификаторов, образуют крупнокристаллическую структуру, а многие ограниченно растворимые легирующие элементы — неравновесные эвтектики, располагающиеся на границах зерен, что способствует появлению горячих трещин в швах.

Для повышения стойкости магниевых сплавов против образования кристаллизационных трещин их модифицируют редкоземельными элементами (например, лантаном в количестве $0,5 \dots 1\ \%$), затем при сварке применяют присадочные материалы, наименее склонные к образованию горячих трещин.

Эффективным модификатором сплавов магния с цинком является цирконий, снижающий горячеломкость сплавов не только вследствие измельчения зерен, но и из-за резкого сужения температурного интервала хрупкости и повышения пластичности в этом интервале. На основе системы Mg—Zn—Zr—La разработан высокопрочный сплав ВМД-3, свариваемость которого улучшена за счет легирования лантаном в количестве $0,7 \dots 1,1\ \%$ по массе.

Кромки свариваемых деталей из магния и его сплавов должны подвергаться тщательной зачистке от оксидов и защитной пленки непосредственно перед сваркой механическим способом (шабером или металлической щеткой, изготовленной из проволоки кислотоустойчивой стали 12Х18Н10Т и др.).

Таблица 2.16. Химический состав магниевых деформируемых сплавов

Марка сплава	Массовая доля, %										
	основных компонентов*									примесей, всего, не более	
	Al	Mn	Zn	Zr	Nd	Ni	Cd	La	Ce	нормируемых	прочих
MA1	—	1,3...2,5	—	—	—	—	—	—	—	0,609	0,2
MA2	3,0...4,0	0,15...0,5	0,2...0,8	—	—	—	—	—	—	0,209	0,3
MA2-1	3,8...5,0	0,3...0,7	0,8...1,5	—	—	—	—	—	—	0,196	0,3
MA2-1	3,8...5,0	0,2...0,6	0,8...1,5	—	—	—	—	—	—	0,028	0,1
MA5	7,8...9,2	0,15...0,5	0,2...0,8	—	—	—	—	—	—	0,207	0,3
MA8	—	1,3...2,2	—	—	—	—	—	—	0,15...0,35	0,609	0,3
MA8	—	1,0...1,5	—	—	—	—	—	—	0,15...0,35	0,102	0,1
MA11	—	1,5...2,5	—	—	2,5...3,5	0,1...0,22	—	—	—	0,462	0,3
MA12	—	—	—	0,3...0,8	2,5...3,5	—	—	—	—	0,509	0,3
MA14	—	—	5,0...6,0	0,3...0,9	—	—	—	—	—	0,287	0,3
MA15	—	—	2,5...3,5	0,45...0,9	—	—	1,2...2,0	0,7...1,1	—	0,267	0,3
MA17	—	0,2...0,7	—	—	—	—	—	—	0,7...1,5	0,357	0,3

MA18**	0,5... 1,0	0,1... 0,4	2,0... 2,5	—	—	—	—	—	0,15... 0,35	0,272	0,3
MA19	—	—	5,5... 7,0	0,5... 0,9	1,4... 2,0	—	0,2... 1,0	—	—	0,307	0,3
MA20	—	—	1,0... 1,5	0,05... 0,12	—	—	—	—	0,12... 0,25	0,187	0,3
MA21***	4,3... 5,3	0,01... 0,1	1,0... 2,0	—	—	—	4,0... 5,0	—	0,01... 0,15	0,185	0,3

* Остальное — магний.

** В составе сплава содержится 10,0... 11,5 % лантана.

*** В составе сплава содержится 7,5... 9,0 % лития.

При больших объемах производства применяют химические способы обезжиривания и травления в ваннах растворами специальных составов. Рекомендуется химическая обработка по следующей технологии.

1. Обезжиривание в растворе, содержащем, г/л:
фосфат натрия — 20...30;
карбонат натрия — 30...50;
едкий натр — 20...50;
жидкое стекло — 3...5.
2. Промывка в проточной горячей воде при температурах 50...60 °С в течение 0,5...1 мин.
3. Удаление защитного покрытия в растворе едкого натра 200...300 г/л при температурах 70...80 °С в течение 10...15 мин.
4. Промывка в проточной горячей воде при температурах 50...60 °С в течение 0,5...1 мин, затем в холодной воде.
5. Травление для удаления оксидной пленки при нормальной температуре в течение 2 мин в растворе, содержащем, г/л:
оксид хрома CrO_3 — 150...200;
нитрат натрия — 25...35;
фторид кальция — 2...3.
6. Промывка в холодной проточной воде с применением гидропульта для удаления с поверхности остатков электролита и сушка сжатым воздухом при температурах 60...90 °С.

Если детали после травления хранились сверх допустимого времени, то свариваемые кромки должны подвергаться зачистке шабером непосредственно перед сваркой. Аналогично должны зачищаться кромки больших деталей, недоступных по габаритам для травления в ваннах.

2.5. ТИТАН И ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ

Свойства. Физико-механические свойства технического титана приведены в табл. 2.17. Титан не окисляется на воздухе при температурах до 500 °С, а скорость его коррозии в серной кислоте и морской воде составляет соответственно 50 и $3 \cdot 10^{-5}$ мм/год.

По классам структур титановые сплавы подразделяют на однофазные α - и β -сплавы и двухфазные ($\alpha + \beta$)-сплавы. Различают литейные и деформируемые титановые сплавы.

К литейным относят, например, сплавы марок ВТ1, ВТ5Л (низкой прочности), ВТ3-1Л, ВТЛ1 (средней прочности) и ВТ21Л (высокой прочности), к деформируемым — ВТ4, ВТ5, ВТ5-1, ОТ4, ОТ4-1, ОТ4-2 (средней прочности) и ВТ8, ВТ16, ВТ3-1 (высокой прочности).

Таблица 2.17. Физико-механические свойства технического титана

Марка титана	Вид продукции	Способ производства	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	КСУ, МДж/м ²	НВ
BT1-00	Прутки, поковки, штампованные изделия	Магнито-термический	300... 450	≥ 30	120... 150	116... 149
BT1-0			400... 550		100... 120	131... 163
BT1-1			450... 600			

Примечание. См. примеч. 1 к табл. 1.2, примеч. 2 к табл. 1.4, примеч. 2 к табл. 1.19, примеч. 2 к табл. 2.3.

Таблица 2.18. Химический состав и механические свойства некоторых литейных титановых сплавов

Марка сплава	Массовая доля компонентов, %							$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %
	Al	Cr	Mn	V	Si	Zr	Fe		
BT1	—	—	—	—	—	—	—	40...60	15...23
BT5Л	5,0	—	—	—	—	—	—	70...90	6...12
BT3-1Л	5,5	2,0	2,0	—	0,2	—	—	90...100	5...10
BTЛ1	5,0	—	—	—	0,1	—	—	90...100	5...10
BT21Л	6,6	0,35	0,7	1,2	—	5,0	0,35	100...110	4...7

Примечание. См. примеч. 1 к табл. 1.2, примеч. 2 к табл. 1.19.

Химический состав и механические свойства некоторых литейных титановых сплавов в состоянии поставки представлены в табл. 2.18.

Деформируемые титановые сплавы выпускают трех классов в зависимости от структуры и трех степеней прочности. Кроме того, сплавы нескольких марок обладают жаропрочными свойствами. Характеристики жаропрочных титановых сплавов приведены в табл. 2.19.

Однофазные α -сплавы хорошо обрабатываются резанием, имеют высокие механические характеристики при криогенных температурах, проявляют жаро- и окислительную стойкость. Некоторые марки сплавов могут применяться при температурах 400...500 °С. Большинство титановых сплавов свариваются. Как правило, деформируемые сплавы благодаря высокой пластичности обрабатываются давлением в холодном состоянии при изготовлении простых дета-

Таблица 2.19. Характеристики жаропрочных деформируемых титановых сплавов

Марка сплава	σ_B при 500 °С, МПа	Рабочая температура, °С
BT3-1	750	400
BT8	800	500
BT9	850	550
BT5-1	480	500

Примечание. См. примеч. 1 к табл. 1.2.

лей. При производстве сложных деталей их нагревают до температуры 500...600 °С, а в некоторых случаях и до 600...800 °С.

Двухфазные ($\alpha + \beta$)-сплавы имеют хорошее сочетание механических и технологических свойств, подвергаются закалке и отпуску (старению). После полного цикла термической обработки детали из этих сплавов обладают повышенной прочностью вплоть до высоких температур. Двухфазные сплавы хорошо куются, штампуются и прокатываются. Их выпускают в виде полуфабрикатов (калиброванные прутки разного профиля и сечения, листы, ленты, штампованные заготовки и поковки).

Однофазные β -сплавы в промышленных масштабах не изготавливаются, так как для их производства требуются дорогостоящие дефицитные легирующие элементы (ванадий, молибден, ниобий, тантал). Выпускается лишь так называемый однофазный псевдо- β -сплав (BT15), в котором вместо этих легирующих элементов содержатся алюминий, молибден и хром. Он имеет метастабильную β -структуру, высокую пластичность и свариваемость, хорошо обрабатывается резанием. Данный сплав закаливается при температурах 760...800 °С и подвергается старению при 450...480 °С. После термической обработки предел прочности BT15 достигает 1 300...1 500 МПа. Детали из этого сплава имеют рабочую температуру до 250 °С.

Деформируемые титановые сплавы выпускают в соответствии с ГОСТ 19807—91 «Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки» в виде листов толщиной 0,3...10,5 мм, шириной 400...1 200 мм и длиной 1 500...2 000 мм. Эти сплавы благодаря малой плотности ($(4,4...4,9) \cdot 10^3$ кг/м³) и высокой удельной прочности находят весьма широкое применение.

Характеристики деформируемых титановых сплавов представлены в табл. 2.20.

Свариваемость. К числу основных затруднений, встречающихся при сварке титана, относится его большая химическая активность при высокой температуре, особенно в расплавленном состоянии,

Таблица 2.20. Характеристики деформируемых титановых сплавов

Марка сплава	Термическая обработка		$\sigma_{в}$, МПа	δ , %	НВ	Класс согласно свойствам	
	Вид	Температура, °С					
BT5	Отжиг	740...760	700...950	10...15	240...300	Средней прочности	
BT5-1		860...880	750...950				
OT4-1		670...720	600...750	20...40	210...250	Высокой пластичности	
OT4			700...900	12...20	—		
BT4		700...750	850...1050	15...22			
OT4-2		750...800	950...1000	8			
BT6	Закалка	800...940	1100...1150	14...16		Высокой прочности	
	Старение	500					
BT14	Закалка	860...880	1140...1150	6...10	340...370		
	Старение	500					
BT15	Закалка	760...800	1300...1500	3...6	—	Высокой прочности	
	Старение	500					
BT16	Закалка	790	1250...1450	4...6			
	Старение	500					
BT3-1	Изотермический отжиг	650...870	1000...1200	10...16	260...340	Жаропрочные	
BT8	Закалка	900...950	1000...1150	9...16	310...350		
	Старение	500...600					
BT9	Закалка	900...950	1140...1300	5...14	330...370		
	Старение	500...600					

Примечание. См. примеч. 1 к табл. 1.2, примеч. 2 к табл. 1.19, примеч. 2 к табл. 2.3.

по отношению к газам (кислороду, азоту и водороду). Обязательным условием получения качественного соединения при сварке титана плавлением является надежная защита от газов атмосферы не только сварочной ванны, но и остывающих участков металла шва и околошовной зоны вплоть до температур 300...400 °С. Необходимо

также тщательно защищать и обратную сторону (корень) шва даже в том случае, если слои металла не расплавились, а нагревались выше этой температуры.

Из-за высокой химической активности титана по отношению к газам для защиты зоны сварки от воздуха можно применять только инертные газы высокой степени чистоты или бескислородные фторидно-хлоридные флюсы.

Дополнительные затруднения при сварке создает большая склонность титана к росту зерен при нагреве до высоких температур, особенно в области β -фазы (выше 882°C). Низкая теплопроводность титана способствует увеличению времени нахождения шва и околшовной зоны при высокой температуре, усугубляя тем самым рост зерен. Для преодоления указанного затруднения сварку плавлением α - и псевдо- α -сплавов выполняют при минимально возможной погонной энергии, а контактную — с кратковременными нагревами. При сварке двухфазных ($\alpha + \beta$)-сплавов, чтобы избежать неблагоприятного сочетания α - и β -фаз и возможности образования ω -фазы, погонную энергию увеличивают. Режимы с малыми скоростями охлаждения обеспечивают на таких сплавах повышение пластичности околшовных участков зоны термического воздействия. Высоколегированные ($\alpha + \beta$)-сплавы, псевдо- β - и β -сплавы сваривают на режимах, позволяющих получать среднюю и высокую скорости охлаждения.

От других конструкционных металлов титан отличается максимальной температурой плавления. Поэтому при сварке титана требуются концентрированные источники теплоты. В то же время в связи с более низким, чем у стали, коэффициентом теплопроводности, повышенным электросопротивлением и пониженной теплоемкостью при сварке титана плавлением тратится меньше энергии, чем при сварке углеродистой стали.

Титан и его сплавы не склонны к образованию кристаллизационных трещин в металле шва. Это объясняется благоприятным сочетанием физико-механических свойств: малой величиной литейной усадки в сочетании с повышенной прочностью и пластичностью металла в области высоких температур. Для титановых швов характерен узкий интервал кристаллизации. Поскольку пластичность металла в этом интервале высока, сварные швы титановых сплавов стойки против образования кристаллизационных трещин.

Наиболее частыми дефектами сварных швов являются поры и холодные трещины. Главная причина образования пор в швах — газовые примеси (в первую очередь водород), растворенные в основном и присадочном металле и адсорбированные на поверхностях свариваемых кромок и проволоки. Значительную роль в образовании пористости в титановых швах играют наследственные дефекты

полуфабрикатов — газовые коллекторы и микропоры, на базе которых при сварке зарождаются газовые пузырьки. Для того чтобы получить беспористые швы, необходимо обеспечить требуемую чистоту основного металла и сварочных материалов, а также чистоту обработки кромок: сварку выполнять на оптимальных режимах с соблюдением всех требований технологии. Наиболее радикальным методом предупреждения пор в швах является применение галогенидных флюсов при сварке.

Холодные трещины в сварном соединении возникают при понижении пластичности разных его участков. К этому приводит повышенное содержание в основном металле и шве примесей внедрения — газов. Трещины такого типа могут возникать сразу же после сварки, а также после вылеживания сварных изделий (процесс замедленного разрушения). Главной причиной замедленного разрушения является выделение водорода из твердого раствора с образованием гидридов титана, связанное с охрупчиванием металла в результате возникновения локальных внутренних напряжений, которые складываются с остаточными растягивающими напряжениями и с напряжениями от внешней нагрузки.

При сварке сплавов на основе титана, чувствительных к термическим циклам сварки ($(\alpha + \beta)$ -сплавы, псевдо- β -сплавы), затруднения возникают из-за возможности образования хрупких фаз (например, ω -фазы, интерметаллидов) и неблагоприятной структуры отдельных составляющих в результате распада β -фазы в процессе охлаждения после сварки, а также дальнейшей упрочняющей термической обработки (закалка с последующим старением).

Специфические физические свойства титана определяют ряд технологических особенностей сварки. Вблизи точки плавления поверхностное натяжение жидкого титана составляет 1,39 Па, что в 1,5 раза выше, чем, например, алюминия. Это обеспечивает благоприятное формирование корня шва при сварке на весу. Однако при несоблюдении требований к точности сборки под сварку трудно избежать прожогов, так как расплавленный титан обладает низкой вязкостью (коэффициент вязкости уменьшается в 2,5 раза при возрастании температуры от 1 730 до 1 920 °С).

Для титана и его сплавов применяют следующие способы сварки: дуговая в среде инертных газов плавящимся и неплавящимся электродами, электронно-лучевая сварка, автоматическая под флюсом, все основные разновидности электрошлаковой сварки, контактная, диффузионная, прессовая (в вакууме и инертной атмосфере), холодная, взрывом, прокаткой.

Качество сварных соединений во многом определяется технологией подготовки кромок деталей и титановой проволоки под сварку. Подготовительные операции выбирают в зависимости от исходного состояния заготовки. У плоских листовых заготовок после рез-

ки на гильотине, деталей простой формы, изготовленных холодной штамповкой и т. п., механически обрабатывают кромки.

Для предварительной разрезки заготовок с последующей механической обработкой кромок используют газовую и плазменную резку. Газовую резку необходимо выполнять на повышенной по сравнению со сталью скорости и пониженной мощности пламени из-за более интенсивного выделения теплоты в зоне реза. Обработка кромок механическим способом после резки должна производиться на глубину не менее 3...5 мм. Непосредственно перед сваркой кромки на ширине 15...20 мм от стыка зачищают металлической щеткой или шабером и обезжиривают спиртом-ректификатом либо чистым или химически чистым ацетоном.

Заготовки, подвергнутые перед сваркой горячей обработке (вальцовке, ковке, штамповке и др.) или термической обработке в печах без защитной атмосферы, проходят комплексную обработку, включающую дробеструйную или гидropескоструйную очистку поверхности с последующим химическим разрыхлением оксидно-нитридной пленки, травлением, осветлением и промывкой. Промывка свариваемых кромок и прилегающих к ним участков металла на ширине до 20 мм выполняется бензином Б-70 с последующим обезжириванием этиловым спиртом-ректификатом или ацетоном.

При неполном удалении газонасыщенной пленки на поверхности титана может остаться альфированный слой. Сохранение такого слоя на свариваемых кромках недопустимо, так как переход газов из слоя в шов вызывает его охрупчивание.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие металлы называют цветными?
2. Какие из цветных металлов относят к легким?
3. Каким образом классифицируют сплавы цветных металлов по технологическим свойствам?
4. Что такое латунь?
5. Какие сплавы относят к бронзам?
6. В чем особенность бериллиевых бронз?
7. По каким признакам классифицируют алюминиевые сплавы?
8. Какие сплавы называют силуминами?
9. Какими по структуре бывают титановые сплавы?
10. Какова коррозионная стойкость сплавов на основе титана?
11. Почему чистый магний не используют для изготовления изделий?
12. Назовите марки магниевых сплавов.
13. В чем заключаются особенности свариваемости магниевых сплавов?

ПОРОШКОВЫЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

3.1. ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

3.1.1. Общие сведения

Методы порошковой металлургии позволяют создавать принципиально новые материалы, которые сложно или даже невозможно получить другими способами: многослойные композиции, различные комбинации металлических и неметаллических компонентов, пористые материалы с широким диапазоном контролируемой пористости, изделия из тугоплавких металлов. Порошковая металлургия дает возможность свести к минимуму отходы металла в стружку, упростить технологию изготовления деталей и снизить трудоемкость их производства.

Технологический процесс изготовления изделий из порошков включает в себя получение порошков, подготовку шихты, формование, спекание, горячее прессование и штамповку. Иногда применяют дополнительную обработку, состоящую из пропитки деталей смазочными материалами, термической и химико-термической обработки, калибровки и обработки резанием.

Размеры частиц порошка обычно составляют от 0,1 мкм до 0,1 мм. Более крупные фракции называют *гранулами*, более мелкие — *пудрой*.

Металлические *порошки* получают физико-механическими и химико-металлургическими способами. В основе физико-механических способов получения порошков лежат методы механического измельчения металлов в твердом и жидком состояниях. К ним относятся дробление и размол стружки в мельницах, распыление расплавленного металла струей сжатого воздуха, газа или жидкости, грануляция при литье расплавленного металла в жидкость и др.

К химико-металлургическим относятся способы восстановления металлов из оксидов, электролитическое осаждение металлов из водных растворов солей, термическая диссоциация карбонильных соединений металлов.

При формировании заготовок из порошков определенного химического состава прессованием им придают форму и размеры

готовых деталей, после чего подвергают спеканию. При спекании непрочные прессованные заготовки превращаются в прочные спеченные изделия со свойствами, приближающимися к свойствам беспористого компактного материала. Температура спекания деталей из конструкционных материалов на основе железа с добавками графита, никеля и других компонентов составляет 1 100... 1 200 °С.

Температура спекания изделий антифрикционного назначения на основе железа составляет 1 000... 1 050 °С, на основе бронзы — 850... 950 °С. Спекание проводят в течение 0,5... 1,5 ч в нагревательных печах, как правило, в защитной атмосфере или в вакууме для предотвращения окисления частиц порошка. Для получения более высоких характеристик механических и эксплуатационных свойств материалов и повышения точности размеров после формования и спекания дополнительно производят горячее прессование, штамповку, прокатку.

Термической обработке порошковых деталей присущи некоторые специфические особенности. Пористость повышает окисляемость порошковых материалов, вследствие чего их нагрев целесообразно проводить в защитной атмосфере. Поры, заполненные газом, снижают теплопроводность, что ухудшает прокаливаемость пористых материалов по сравнению с компактными. Для пористых деталей целесообразно применение закалки с резким охлаждением в струе воды или с энергичным перемешиванием для ускорения срыва паровой рубашки, затрудняющей охлаждение. После закалки детали обязательно просушивают до полного удаления влаги из пор.

В ряде случаев дополнительно проводят химико-технологическую обработку деталей из порошковых материалов. Цементацию и нитроцементацию применяют для повышения твердости и износостойкости поверхностного слоя. Азотирование позволяет получать высокую твердость, усталостную прочность и коррозионную стойкость деталей.

Сульфидирование применяют с целью уменьшения коэффициента трения для повышения износостойкости и твердости железных и железографитовых изделий. Наиболее простой способ сульфидирования — пропитка серой: погружение пористых изделий в расплавленную серу при температурах 140... 160 °С (выдержка в течение 10... 15 мин) с последующим нагревом до 400... 500 °С в герметизированной печи с азотводородной атмосферой.

Оксидирование обработкой паром применяют для повышения износостойкости и коррозионной стойкости порошковых деталей на железной основе. Обычно используют обработку паром при температуре 550 °С в течение 1 ч с последующим охлаждением в масле. При взаимодействии паров воды с железом на поверхности деталей и на поверхности открытых пор образуется прочная коррозионно-стойкая пленка.

3.1.2. Конструкционные материалы

Изделия для машиностроения — наиболее распространенный вид продукции порошковой металлургии. При их производстве почти полностью отсутствуют отходы, они имеют минимальную стоимость и трудоемкость. Конструкционные порошковые материалы подразделяют на материалы общего назначения, заменяющие обычные углеродистые и легированные стали, чугуны и цветные металлы, и материалы, обладающие специальными свойствами, — высокой износостойкостью, твердостью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью, специфическими магнитными и электрическими характеристиками. В зависимости от условий нагружения различают мало-, средне- и тяжело нагруженные детали, последние, в свою очередь, делятся на тяжело нагруженные статическими и динамическими усилиями.

Чем выше требования по прочности, тем меньше должна быть пористость металла. По плотности (пористости) порошковые детали подразделяют на четыре группы. Тяжелонагруженные статическими усилиями детали изготавливают из порошков углеродистых или легированных сталей и цветных сплавов, при этом пористость материала не должна превышать 9 %. Изделия получают холодным прессованием и спеканием с последующей дополнительной горячей и холодной штамповкой или горячим прессованием. Применяют также пропитку легкоплавкими металлическими расплавами с последующей термической обработкой. Тяжелонагруженные динамическими нагрузками детали изготавливают из порошков углеродистых и легированных сталей и сплавов цветных металлов с пористостью не более 2 %. В этом случае проводят холодное прессование, спекание, горячую штамповку, горячее прессование или химико-технологическую обработку.

На рис. 3.1 представлена зависимость относительной прочности от относительной плотности порошковых материалов при различных технологических процессах формообразования:

$$\sigma_{\text{отн}} = (\sigma_{\text{пор}} / \sigma_{\text{комп}}) 100 \%;$$

$$\gamma_{\text{отн}} = (\gamma_{\text{пор}} / \gamma_{\text{комп}}) 100 \% ,$$

где $\sigma_{\text{пор}}$, $\gamma_{\text{пор}}$ — прочность и плотность порошковых материалов; $\sigma_{\text{комп}}$, $\gamma_{\text{комп}}$ — прочность и плотность композитов.

С увеличением плотности одновременно возрастают пластичность и ударная вязкость. Изменяя пористость, можно регулировать плотность и механические свойства, подбирать материалы с заданными свойствами для конкретных условий работы изделий.

Порошковые стали по механическим свойствам не уступают литым и кованым сталям соответствующего состава. Так, мартенситно-

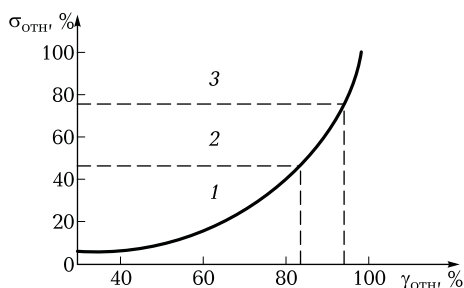


Рис. 3.1. Зависимость относительной прочности порошковых конструкционных материалов $\sigma_{отн}$ от их относительной плотности $\gamma_{отн}$ и технологии формообразования:

1 — статическое холодное прессование; 2 — высокоскоростное холодное прессование; 3 — горячая штамповка

стареющие стали благодаря возможности повышения содержания титана до 2...3 % имеют временное сопротивление $\sigma_B = 2000$ МПа при ударной вязкости $KCU = 0,3...0,4$ МДж/м².

Основой для получения порошковых коррозионно-стойких материалов обычно служат порошки сталей и сплавов определенного состава.

Перспективно использование порошков титана и его сплавов для изготовления тяжело нагруженных деталей. Высокие механические свойства порошковых изделий на основе титана ($\sigma_B = 650...900$ МПа; $\delta = 8...16$ %) позволяют применять их для изготовления шатунов автомобильных двигателей, что существенно уменьшает массу, снижает инерционные силы и повышает мощность двигателя. Из порошков титана организовано серийное производство таких деталей, как втулки, крышки, трубы для химического и пищевого машиностроения, приборостроения и др.

3.1.3. Пористые фильтрующие материалы

Свойства. Для изготовления фильтрующих элементов обычно применяют ткани, войлок, керамику, фарфор, а также сетчатые фильтры из различных материалов. Их недостатками являются низкая коррозионная стойкость, недостаточная механическая прочность, низкая термостойкость и жаропрочность. В большинстве случаев они не допускают высоких перепадов давлений, с трудом поддаются регенерации.

Высокопористые порошковые металлические материалы благодаря жесткому пространственному каркасу имеют более высокую прочность, выдерживают резкие колебания температур, легко об-

рабатываются, свариваются и паяются, обеспечивают необходимую коррозионную стойкость, жаростойкость, теплопроводность. Вследствие высокой пористости такие материалы имеют хорошую проницаемость для жидкостей и газов при достаточно тонкой фильтрации (до 30 мкм), легко регенерируются (при этом почти полностью восстанавливают свои первоначальные свойства), не засоряют фильтрующиеся жидкости или газы материалами фильтра.

Технология изготовления металлических пористых элементов зависит от их формы и размеров. Фильтры небольших размеров получают спеканием свободно засыпанного порошка. Для более крупных фильтров используют холодное прессование и последующее спекание, для тонких пористых лент — прокатку.

Для изготовления пористых проницаемых элементов применяют порошки различных металлов и сплавов: углеродистых и коррозионно-стойких сталей различных марок, сплавов никеля с хромом и молибденом, сплавов меди, титана, алюминия, вольфрама, молибдена и др. В технике наибольшее распространение получили фильтры из коррозионно-стойкой стали, бронзы, сплавов никеля, циркония и титана.

Применение порошковых материалов позволяет увеличить срок службы насосов, двигателей и других агрегатов, работающих на очищенных жидкостях. С их помощью повышается эффективность химических процессов и улучшается качество вакуумной продукции, создаются возможности для получения материалов с новыми свойствами.

Химический состав и основные механические характеристики порошковых стальных материалов для изготовления фильтрующих элементов представлены в табл. 3.1 и 3.2.

Свариваемость. Возможности получения проницаемых изделий больших размеров и сложной формы из пористых порошковых материалов (ППМ) весьма ограничены. По этой причине перспективы их применения неразрывно связаны с проблемой получения сварных конструкций, отвечающих условиям эксплуатации, путем соединения пористых элементов аргонодуговой, шовной, электронно-лучевой и диффузионной сваркой.

Результаты исследования свариваемости ППМ в условиях аргонодуговой сварки показали, что при пористости основного мате-

Таблица 3.1. Химический состав материалов ФНС-5 и ФНС-2-3

Массовая доля основных элементов, %			Массовая доля примесей, %, не более				
Fe	Cr	Ni	C	Mn	Si	S	P
Основа	16... 18	14... 16	0,07	0,40	0,22	0,015	0,014

Таблица 3.2. Механические свойства материалов ФНС-5 и ФНС-2-3

Марка материала	Полуфабрикат	Относительная пористость, %	γ , кг/м ³	$\sigma_{в1}$ МПа	δ , %	$\sigma_{сж1}$ МПа	КСУ, МДж/м ²	НВ
ФНС-5	Пористая спеченная лента	50 ... 55	5 020 ... 4 550	40 ... 65	0,1 ... 0,2	—	—	—
	Прессованные спеченные заготовки			—	—	1 250 ... 1 300	1 ... 2	19
ФНС-2-3	Пористая спеченная лента	17 ... 21	6 120 ... 5 520	110 ... 170	1,6 ... 4,8	—	—	—
	Прессованные спеченные заготовки			—	—	600 ... 700	3,7 ... 7,1	26 ... 29

Примечания: 1. См. примеч. 1 к табл. 1.2, примеч. 2 к табл. 1.4, примеч. 2 к табл. 1.19, примеч. 2 к табл. 2.3.

2. γ — плотность, $\sigma_{сж}$ — предел прочности при сжатии.

риала $P = 0,4 \dots 0,6$ для формирования шва необходимо применять присадочный материал аналогичного химического состава. При сварке ППМ из-за наличия в них закрытых пор основным дефектом являются сквозные свищи в шве, образующиеся при выбросе металла в процессе расплавления кромок. Кроме того, применение аргодуговой сварки при изготовлении проницаемых конструкций ограничено, поскольку образуются широкие швы, которые существенно снижают поверхность фильтрации.

Проведенные эксперименты по электронно-лучевой сварке пористых элементов из материалов ФНС-2, ФНС-5, ФНС-10 на стандартном оборудовании показали возможность получения равнопрочных соединений. Однако в результате образования неравномерной структуры, характерной для высокопористых порошковых материалов, на участках с большим размером пор возникали прожоги.

Эффективность использования шовной сварки высокопористых порошковых материалов из сталей X18N15 и 12X18N9T снижается из-за высокой склонности этих материалов к образованию в шве сквозных поперечных трещин. Они возникают во время охлаждения в местах отсутствия литой структуры в швах, полученных частично или полностью в твердой фазе. Причинами их появления являются нестабильность макроструктуры, низкая прочность и малая деформационная способность высокопористых сталей из коррозионно-стойких порошков, высокий коэффициент термического расширения и наличие на поверхности частиц стойких и прочных оксидов с большим содержанием хрома. В результате этого существует достаточно широкая область режимов сварки, в которой деформационная способность швов остается меньше накопленной внутренней деформации, а прочность оказывается ниже остаточных сварочных напряжений.

С увеличением пористости и размера частиц порошка механические свойства ППМ снижаются, а диапазоны режимов сварки, характеризующиеся трещинообразованием, расширяются. Уровень свойств, обеспечивающих стойкость нахлесточных соединений против трещинообразования, может быть гарантирован при создании в шве непрерывной литой структуры. В конструкциях, допускающих использование шовно-точечных соединений, повышение технологической прочности целесообразно осуществлять путем снижения остаточных напряжений в результате обеспечения расстояния между точками, равного $5 \dots 6$ мм.

В ряде случаев нахлесточные соединения нежелательны по конструктивным или иным соображениям. Для получения стыковых соединений необходимо использовать метод контактной шовной сварки с раздавливанием кромок, при котором наблюдается значительная деформация частиц. Она вызывает более интенсивное, чем у нахлесточных соединений, разрушение оксидных пленок на по-

верхности частиц порошка и способствует расширению области режимов, не приводящих к образованию трещин. Увеличение дисперсности порошка и пористости основного материала облегчает формирование соединения при сварке с раздавливанием кромок. В то же время качество соединений исследуемых материалов в первую очередь зависит от величины нахлестки, которая при толщине более 1 мм не должна превышать полуторной толщины материала, а с уменьшением толщины может быть увеличена.

3.1.4. Пористые сетчатые материалы

Металлические сетки и их свойства. При производстве пористых сетчатых материалов (ПСМ) в основном применяют тканые металлические сетки. Их изготавливают на металлотакающих станках, переплетая параллельно натянутые продольные проволоки (основы) поперечными проволоками (утка). Поставляют сетки в виде рулонов шириной от 600 до 2 000 мм и длиной от 5 до 20 м.

Изменяя отношение диаметров проволок, расстояние между ними, а также характер переплетения утка через основу, получают сетки разнообразных видов и конструкций. Наиболее распространены тканые сетки с квадратными ячейками, расстояния между проволоками утка которых равны расстояниям между проволоками основы, а диаметры проволок основы и утка одинаковы, и фильтровые сетки, проволоки утка которых плотно, без щелей, прилегают одна к другой, а отношение диаметра проволоки утка к диаметру проволоки основы всегда меньше 1.

По конструктивному признаку эти сетки могут быть полотняного переплетения (проволока утка переплетает каждую проволоку основы), саржевого переплетения односторонние (одна проволока утка переплетает по две проволоки основы) и саржевого переплетения двусторонние (одна проволока утка переплетает поочередно то одну, то две проволоки основы).

Для изготовления сеток применяют термически обработанную проволоку из низкоуглеродистой стали общего назначения, высоколегированной и жаростойкой стали (например, 12Х18Н10Т, Х17Н13М2Т, Х17Н13М3Т), фосфористой бронзы, монель-металла, никеля и других материалов и сплавов. Тканую сетку изготавливают из проволоки достаточно высокой пластичности (относительное их удлинение должно быть не менее 20 %).

Рассмотрим сетки полотняного переплетения с квадратной ячейкой и фильтровые сетки из коррозионно-стойких сталей, а также технологию производства ПСМ на их основе.

Проницаемость, тонкость очистки, прочность и другие служебные характеристики ПСМ в большинстве случаев однозначно

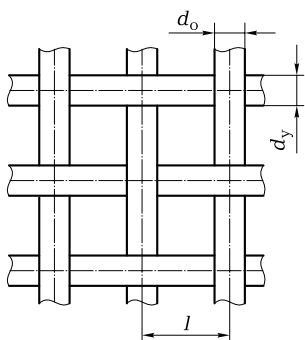


Рис. 3.2. Конструкция сетки с квадратной ячейкой

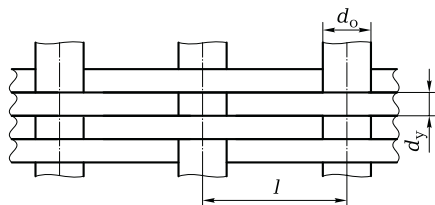


Рис. 3.3. Конструкция фильтровой сетки

определяются строением внутреннего порового пространства материала. Характеристики, описывающие внутреннее строение пористого тела, называются *структурными характеристиками* (пористость, относительная плотность, скважность или просветность, средний размер пор, характер их распределения, форма и др.).

Для правильного выбора тех или иных сеток при разработке технологии производства ПСМ с заданными свойствами необходимо знать исходные значения их структурных характеристик.

На рис. 3.2 и 3.3 приведены конструкции сетки с квадратными ячейками и фильтровой сетки полотняного переплетения. Размерный ряд сеток этой конструкции регламентирован, номер сетки с квадратными ячейками обозначает размер ячейки «в свету» в миллиметрах, а номер фильтровой сетки характеризует номинальное число проволок основы на 1 дм. Для каждого номера сетки определены также номинальные диаметры переплетаемых проволок. Таким образом, конструкции рассматриваемых сеток характеризуются диаметром проволоки основы d_o , диаметром проволоки утка d_y , расстоянием между проволоками основ l . Если в качестве определяющего размера принять диаметр основы d_o , то остальные геометрические параметры сетки выражаются через безразмерные величины n_d и n_l : $n_d = d_y/d_o$; $n_l = l/d_o$.

Для фильтровых сеток всегда $n_d < 1$, $n_l > 2$. Для сеток с квадратными ячейками $n_d = 1$, $n_l > 2$. Безразмерные коэффициенты n_d и n_l позволяют проводить анализ структурных характеристик в общем виде, не связывая их с конкретными размерами сеток.

Технология получения. Основными технологическими операциями получения ПСМ являются подготовка сетки, сборка брикета сеток, вакуумирование конверта, нагрев и прокатка.

Металлическая сетка размечается и разрезается на карточки необходимых размеров с помощью гильотинных ножниц или вибро-

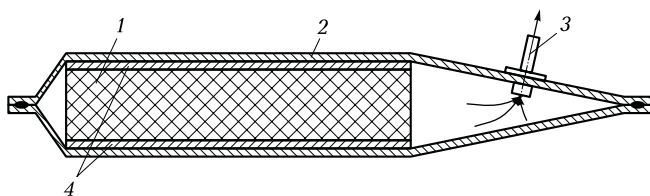


Рис. 3.4. Схема размещения брикета сеток в конверте:

1 — брикет сеток; 2 — конверт; 3 — штуцер; 4 — разделительные обкладки

ножниц. Нарезанные карточки промывают во фреоне или в моющих водных растворах типа «Триалон», «Деталин». Затем сетка нагревается в печи при 823... 873 °С в течение 5... 10 мин.

После очистки сетки собирают в брикет, при этом их взаимное расположение выбирают из условия получения требуемых свойств материала. Брикет сеток помещают в конверт, представляющий собой металлическую оболочку из низкоуглеродистой стали толщиной 0,5... 1,0 мм, сваренную по контуру шовной сваркой (рис. 3.4). Для предотвращения сварки сеток с конвертом в него помещают разделительные обкладки 4 из жаростойкой стали Х12Н35ГТЗЮ. Вакуумирование конверта осуществляется через штуцер 3 с помощью вакуумной установки, состоящей из последовательно соединенных форвакуумного и бустерного насосов.

После достижения разрежения порядка 1 Па между штуцером и полостью конверта с брикетом сеток, не отключая последней от вакуумной установки, прокладывают сварной шов. Затем часть конверта со штуцером отрезают гильотинными ножницами.

После вакуумирования герметично заваренный конверт подается на участок прокатки, где нагревается (до 1 147... 1 197 °С для стали 12Х18Н10Т и 847... 897 °С для латуни Л80) и затем прокатывается за один проход на двухвалковом листовом стане.

Нагрев конверта осуществляют в электропечи сопротивления, при этом на его поверхности образуется окалина. Поэтому поверхность конверта защищают листом жаропрочной стали или покрытием на основе порошка двуоксида алюминия.

Для прокатки используют стан, снабженный гладкими валками диаметром 350 мм с длиной бочки 700 мм. При настройке валков на нужный размер деформациями разделительных обкладок и листа, из которого изготовлен конверт, пренебрегают. Такое допущение вполне корректно, поскольку давление металла на валки при прокатке ПСМ в среднем на порядок меньше давлений при прокатке сплошных металлов аналогичного химического состава.

После прокатки и охлаждения на воздухе конверт вскрывают по периметру с помощью гильотинных ножниц. Пористый лист на участке контроля проверяют на соответствие техническим услови-

ям по пористости, проницаемости, размеру пор, прочности, разнотолщинности и др.

Пористые сетчатые материалы из стали 12Х18Н10Т прокатывают шириной от 200 до 400 мм, длиной от 250 до 1 000 мм и толщиной 0,5... 20 мм.

Механические свойства. Механические свойства ПСМ характеризуются технологическими параметрами сварки прокаткой, типом плетения сеток, способом их расположения и свойствами проволок сеток. Необходимым условием получения ПСМ является сварка проволок сеток между собой. При этом качество соединения проволок в значительной степени определяет прочность ПСМ на отрыв. Прочность материала на отрыв определяется площадью, на которой произошло образование металлических связей. Площадь, воспринимающая растягивающее усилие при испытании материала на отрыв, характеризуется площадью единичного соединения проволок двух соседних слоев сеток и количеством таких соединений.

С ростом степени деформации сеток в процессе сварки прокаткой происходит возрастание прочности ПСМ на отрыв (рис. 3.5), что объясняется увеличением площади, на которой образовалось соединение. Для фильтровых сеток при деформации $\varepsilon > 0,45$ крестообразные соединения образуются всеми проволоками утка соседних слоев сеток, поэтому небольшому приращению $\Delta\varepsilon$ соответствует значительное изменение прочности ПСМ на отрыв.

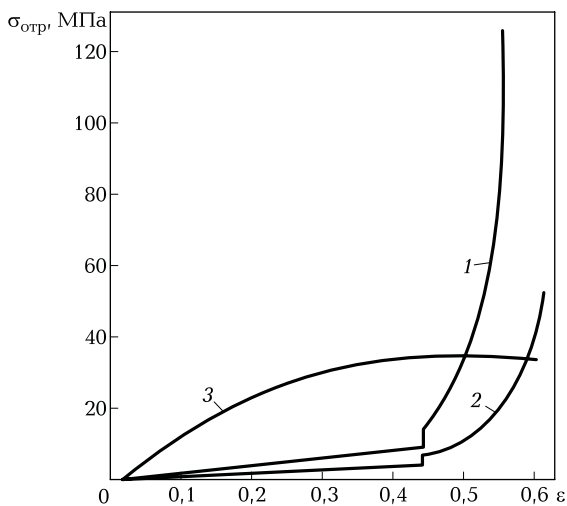


Рис. 3.5. Зависимость предела прочности на отрыв $\sigma_{отр}$ пористых сетчатых материалов от степени деформации ε брикета сеток:

1 — сетка № 60 (12Х18Н10Т); 2 — сетка № 60 (Л80); 3 — сетка № 008 (12Х18Н10Т)

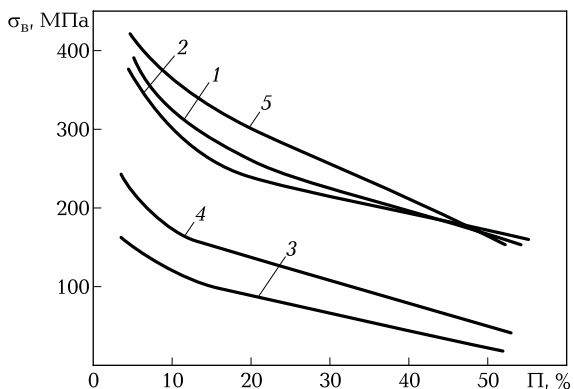


Рис. 3.6. Зависимость временного сопротивления $\sigma_{в}$ пористых сетчатых материалов от пористости Π :

1 — на основе сеток с квадратными ячейками при параллельном (перпендикулярном) расположении (12X18H10T); 2 — на основе фильтровых сеток полотняного переплетения при перпендикулярном расположении слоев в направлении основы и утка (12X18H10T); 3 — на основе фильтровых сеток полотняного переплетения при перпендикулярном расположении слоев в направлении основы и утка (Л80); 4 — на основе фильтровых сеток полотняного переплетения при параллельном расположении сеток в направлении основ (12X18H10T); 5 — на основе фильтровых сеток полотняного переплетения при параллельном расположении сеток в направлении утка

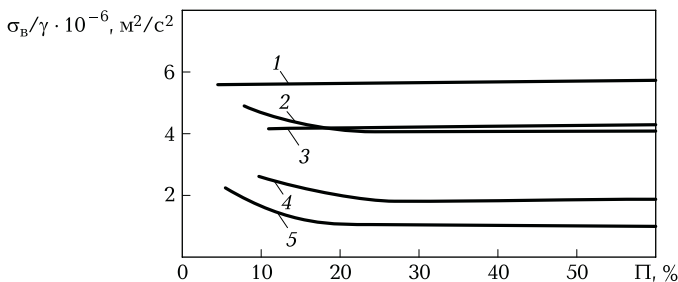


Рис. 3.7. Зависимость удельной прочности $\sigma_{в}/\gamma$ пористых сетчатых материалов от пористости Π :

1 — на основе фильтровых сеток полотняного переплетения при параллельном расположении в направлении утка (12X18H10T); 2 — на основе фильтровых сеток полотняного переплетения при перпендикулярном расположении (12X18H10T); 3 — на основе сеток с квадратными ячейками при параллельном (перпендикулярном) расположении (12X18H10T); 4 — на основе фильтровых сеток полотняного переплетения при параллельном расположении сеток в направлении основ (12X18H10T); 5 — на основе фильтровых сеток полотняного переплетения при перпендикулярном расположении (Л80)

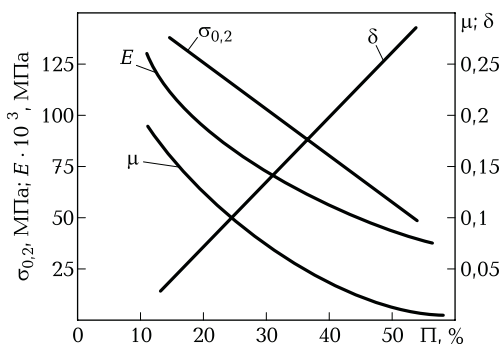


Рис. 3.8. Зависимости условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, модуля упругости E , максимального остаточного удлинения δ и коэффициента пластической поперечной деформации μ от пористости Π материала

На рис. 3.6 и 3.7 представлены зависимости σ_B и σ_B/γ от пористости материала. Наибольшей удельной прочностью обладают материалы на основе фильтровой сетки с параллельным расположением в направлении утка.

На рис. 3.8 приведены зависимости некоторых механических свойств от пористости материала, полученного на основе сетки № 60 из стали 12Х18Н9Т при перпендикулярном расположении сеток.

Свариваемость. Выбор способа сварки элементов конструкций определяется свойствами основного металла и условиями эксплуатации изделий. Наиболее распространенным способом сварки нержавеющей стали 12Х18Н10Т является аргонодуговая.

Автоматическая аргонодуговая сварка ПСМ может выполняться на автоматах АСТВ-2М, АДСВ-2 и автоматических горелках типа АГВ-1, ручная сварка — горелками АР-9, АР-3Б, «Град-400» и др. В качестве источника тока используют универсальные выпрямители типа ВСВУ и балластные реостаты, а защитного газа — аргон высшего сорта по ГОСТ 10157—79 «Аргон газообразный и жидкий. Технические условия».

Основным способом подготовки кромок ПСМ под сварку является фрезерование их стандартным инструментом на тех же режимах, что и при фрезеровании металлов. При механической обработке кромок материала с пористостью $\Pi > 45\%$ для предотвращения расслоения сеток целесообразно зажимать образцы между пластинами, например, из алюминия.

Вследствие значительной внутренней поверхности материала 12Х18Н10Т—ПСМ расход защитного газа при аргонодуговой сварке по сравнению с металлом должен быть увеличен.

Величина сварочного тока в значительной степени определяется пористостью: с возрастанием пористости при заданной толщине материала требуется меньший ток.

Высокое качество сварных соединений достигается на минимально возможном токе, при этом происходит полное проплавление сварного соединения. В связи с этим сварку ПСМ толщиной более 3 мм целесообразно осуществлять с двух сторон.

В случае автоматической сварки стыковых соединений при высоких скоростях ($v_{св} > 0,01$ м/с) полное проплавление сварного соединения достигается при значительном токе. При сварке такого материала с $\Pi > 30\%$ возникают прожоги и подрезы. При скоростях сварки $v_{св} < 0,003$ м/с увеличивается ширина шва, что нежелательно для проницаемых материалов.

Сварку материала с пористостью $\Pi > 15\%$ для устранения подрезов в зоне сплавления необходимо осуществлять с присадочным материалом.

Рекомендуемые режимы автоматической аргодуговой сварки неплавящимся электродом на постоянном токе прямой полярности стыковых соединений приведены в табл. 3.3.

При сварке пористого материала с разными элементами из стали 12Х18Н10Т вследствие различия физических свойств соединяемых элементов количество теплоты, необходимое для расплавления

Таблица 3.3. Режимы автоматической аргодуговой сварки стыковых соединений из материала 12Х18Н10Т – ПСМ

Толщина материала, мм	Пористость Π , %	Ток, А	Скорость подачи проволоки, 10^3 м/с	Расход аргона для защиты дуги, 10^4 м ³ /с
1	10	60...80	—	1...1,4
2	10	100...120	—	1...1,4
3	50	80...90	2...3	2...2,7
3	38	90...100	1,7...2	2...2,6
3	28	110...130	1,7...2	2...2,6
3	20	130...150	0,8...1	1,4...2
3	10	120...140	—	1...1,4
5	15	160...180	—	2...2,6
5	5	180...200	—	2...2,6

Примечания: 1. Напряжение на дуге 10...12 В.

2. Диаметр вольфрамового электрода 2 мм.

3. Для сварки материала с пористостью $\Pi > 15\%$ диаметр присадочной проволоки 2 мм.

4. Скорость сварки 5...7 м/с.

5. Материал толщиной более 3 мм сваривают с двух сторон.

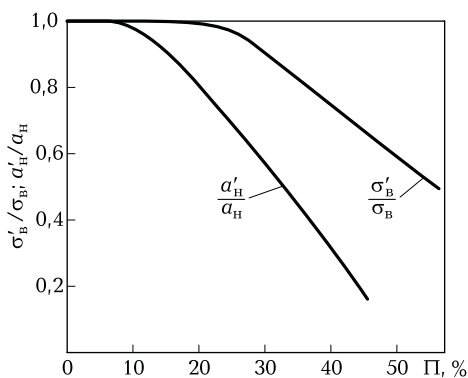


Рис. 3.9. Зависимость относительной прочности σ'_B/σ_B и относительной ударной вязкости α'_H/α_H сварного соединения от пористости материала П

кромки, неодинаковое. Для получения качественного соединения сварочную дугу следует смещать относительно стыка в сторону компактного материала, при этом смещение возрастает с увеличением пористости.

Механические испытания сварных соединений выполнялись на одноосное растяжение и ударную вязкость. Прочность сварных соединений определялась по ГОСТ 6996—66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств» в направлении проволок сеток. Установлено, что с уменьшением пористости основного материала (ПСМ) относительная прочность сварного соединения возрастает и при П = 5 % достигает значений, характерных для основного материала (рис. 3.9).

Условиями работы ряда конструкций из ПСМ предусматриваются сварные швы минимальной ширины. Их можно получить электронно-лучевой сваркой. Разработана технология электронно-лучевой сварки пористого сетчатого материала 12Х18Н10Т — ПСМ.

На относительную прочность сварного соединения сильно влияют пористость основного материала и эффект взаимозависимости пористости и скорости сварки. При этом с уменьшением пористости основного материала и одновременном увеличении скорости сварки достигается наибольшая прочность сварных соединений.

Наилучшие результаты при электронно-лучевой сварке материала с пористостью П = 15 % получаются при скорости сварки 0,014 м/с, а с П = 35 % — при 0,005 м/с. Величина тока луча в интервале $(45...65) \cdot 10^{-3}$ А не оказывает значимого влияния на относительную прочность соединения. Ширина шва на материале толщиной 2... 4 мм составляла 2... 2,5 мм.

Металлографические исследования зоны сплавления сварных соединений, выполненных как аргонодуговой, так и электронно-лучевой сваркой, показали, что сварные соединения, полученные на материале с высокой пористостью, характеризуются наличием подрезов и отсутствием полного сплавления проволок ПСМ с металлом шва. В результате этого уменьшается площадь поперечного сечения образца, воспринимающего растягивающее усилие, и, как следствие, снижаются прочность и ударная вязкость сварного соединения.

3.2. ГРАНУЛИРОВАННЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Высокие скорости охлаждения при кристаллизации алюминиевых сплавов позволяют значительно снизить химическую неоднородность в полуфабрикатах и ввести в сплав большее количество тугоплавких элементов, которые в обычных условиях литья образуют грубые интерметаллиды, т. е. сплавы приобретают новую структуру, влияющую на их свойства. Быстрая кристаллизация приводит к сдвигу линии ликвидуса на диаграмме состояния и образованию из жидкой фазы пересыщенного твердого раствора у алюминиевых сплавов, содержащих элементы переходных групп (Mn, Cr, Ti, Zr, V, Mo, W), за счет закалки из жидкого состояния. Это позволяет получать сплавы с уникальными свойствами.

Первым практическим применением быстрой кристаллизации была отливка непрерывной тонкой листовой заготовки на охлаждаемую водой сетку. Отливая этим методом сплав, содержащий алюминий и 3,5 % марганца, получили пересыщенный твердый раствор марганца в алюминии с низким температурным коэффициентом электросопротивления. Повышенная растворимость при быстрой кристаллизации объяснялась закалкой из жидкого состояния или бездиффузионной кристаллизацией. Алюминиевые сплавы, имеющие узкий интервал кристаллизации вблизи точки плавления алюминия или кристаллизующиеся по перитектической реакции, склонны к закалке из жидкого состояния. Наибольшее пересыщение было получено на пленках толщиной 40...200 мкм, кристаллизующихся на медной подложке, охлаждаемой водой. Скорость кристаллизации при этом составляла $10^5 \dots 10^6$ °C/с (по расчету).

Промышленными методами, обеспечивающими закалку из жидкого состояния, до сих пор остаются распыление с помощью форсунки (порошки) или какого-нибудь специального устройства (гранулы). Высокие скорости кристаллизации здесь достигаются за счет того, что малый объем жидкого металла (диаметр частичек 10...

500 мкм, гранул 1...3 мм) кристаллизуется при непосредственном контакте с холодной водой (гранулы) или струей инертного газа (порошки).

При достигнутых в промышленных условиях скоростях охлаждения ($10^3 \dots 10^4 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$) сплавы Al—Cr, Al—Zr, Al—Mn образуют из жидкого состояния пересыщенные твердые растворы. В структуре частичек порошка сплава алюминия и 2 % хрома интерметаллиды не наблюдаются. Степень пересыщения растет до определенного предела: при увеличении содержания хрома с 3 до 5 % в структуре частичек наблюдаются как пересыщенный твердый раствор, так и первичные кристаллы CrAl_7 . При содержании более 7 % (по массе) фаза CrAl_7 присутствует только в виде первичных кристаллов, образующихся из жидкого расплава.

Полученные пересыщенные твердые растворы неустойчивы и в процессе производства полуфабрикатов (порошки и гранулы при прессовании полуфабрикатов нагревают до температур 400...450 $^\circ\text{C}$) распадаются с выделением дисперсных вторичных интерметаллидов. Поэтому упрочнение этих сплавов осуществляется за счет трех факторов:

- образования пересыщенного твердого раствора;
- наличия в структуре дисперсных первичных выделений интерметаллидов;
- появления вторичных выделений интерметаллидов при распаде полученного пересыщенного твердого раствора в процессе нагрева и деформации.

Установлено, что чем выше концентрация интерметаллидов, тем быстрее распадается твердый раствор при нагревании сплава.

Наиболее перспективной для практического применения оказалась система Al—Cr—Zr, в которой небольшие добавки ванадия и титана значительно повышают временное сопротивление как при комнатной температуре, так и при 400 $^\circ\text{C}$. Жаростойкий коррозионно-стойкий сплав системы Al—Cr—Zr марки 01419 можно получить из порошка либо гранул. Сплав характеризуется высокой технологичностью, из него производят все виды полуфабрикатов. Длительное нагревание при 250...350 $^\circ\text{C}$ не влияет на свойства полуфабрикатов из этого сплава при температурах выдержки. Листы из сплава 01419 сваривают аргонодуговой сваркой присадочной проволокой Св-1557. Отношение предела прочности при растяжении и $\sigma_{\text{в}}$ сварного материала к $\sigma_{\text{в}}$ основного материала составляет 0,8 при температурах 20...300 $^\circ\text{C}$ и приближается к 1 при 350...400 $^\circ\text{C}$. Структура сварного шва плотная. Модельные емкости из листа сплава 01419 толщиной 1 мм со швами, выполненными автоматической и ручной аргонодуговой сваркой, испытанные гидравлическим спосо-

Таблица 3.4. Свойства гранулированного сплава Al – Ni (1,5 %) – Ti (1,0 %)

Температура испытаний, °С	$\sigma_{в}$, МПа	δ , %	σ_{100} , МПа	$\sigma_{0,2/2000}$
20	340	6	—	—
200	240	8	140	90
220	—	—	—	70
250	220	12	140	60

Примечания: 1. См. примеч. 1 к табл. 1.2, примеч. 2 к табл. 1.19.

2. σ_{100} — предел длительной прочности (напряжение, вызывающее разрушение образца за 100 ч); $\sigma_{0,2/2000}$ — предел ползучести (напряжение, вызывающее 0,2% остаточной деформации образца за 2000 ч испытаний).

бом, не разрушались при давлении до 3,5 МПа, а из листа толщиной 2 мм — при давлении до 5,0 МПа. Штампуемость порошкового сплава 01419 в холодном состоянии сравнима со штампуемостью алюминиевого цельнометаллического сплава Д16М. Нагревание листов перед штамповкой до 350...400 °С повышает способность к деформации и дает возможность получать детали довольно сложной конфигурации.

Порошковый сплав, содержащий 1,5% Ni, 1,0% Ti, остальное — Al, обладает высокой коррозионной стойкостью в паровоздушной среде при 250 °С и может широко применяться в облегченных паровоздушных системах. Сплав характеризуется высокой технологичностью и прочностью (табл. 3.4).

Другой перспективной системой является система алюминия с железом. В эвтектическом сплаве Al—Fe пересыщенный твердый раствор не образуется, но возникающие при быстрой кристаллизации первичные кристаллы Al_3Fe имеют необычную форму разветвленных дендритов. Это приводит к повышению $\sigma_{в}$ со 110 до 330 МПа при 20 °С и до 220 МПа при 250 °С.

Разработка порошковых жаропрочных материалов значительно расширяет температурную область применения этих сплавов.

3.3. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

3.3.1. Общая характеристика и классификация

Традиционно применяемые металлические и неметаллические материалы в значительной мере достигли своего предела конструктивной прочности. Вместе с тем развитие современной техники

требует создания материалов, надежно работающих в сложной комбинации силовых и температурных полей, при воздействии агрессивных сред, излучений, глубокого вакуума и высокого давления. Зачастую требования, предъявляемые к материалам, могут носить противоречивый характер. Удовлетворить эти требования можно путем использования композиционных материалов.

Композиционным материалом, или композитом, называют объемную гетерогенную систему, состоящую из сильно различающихся по свойствам, взаимно нерастворимых компонентов. Строение системы позволяет использовать достоинства каждого из них.

Принцип построения композита человек заимствовал у природы. Типичными композиционными материалами являются стволы деревьев, стебли растений, кости человека и животных. Композиты позволяют иметь заданное сочетание разнородных свойств: высокой удельной прочности и жесткости, жаропрочности, износостойкости, теплозащитных свойств. Спектр свойств композитов невозможно получить при использовании обычных материалов. Их применение позволяет создавать принципиально новые конструкции. Благодаря композитам стал возможен новый качественный скачок в увеличении мощности двигателей, уменьшении массы машин и конструкций.

Важными характеристиками композиционных материалов являются удельная прочность и удельная жесткость (отношение предельных напряжений и модуля упругости соответственно к плотности материала). По удельной прочности и жесткости композиты превосходят все известные конструкционные сплавы.

Композиты состоят из сравнительно пластичного матричного материала — основы и более твердых и прочных компонентов, являющихся наполнителями. Свойства композитов зависят от свойств основы, наполнителей и прочности связи между ними.

Матрица связывает композицию в монолит, придает ей форму и служит для передачи внешних нагрузок арматуре из наполнителей. В зависимости от материала основы различают композиты с металлической матрицей — металлические композиционные материалы, с полимерной — полимерные композиционные материалы и с керамической — керамические композиционные материалы.

Ведущую роль в упрочнении композитов играют наполнители, часто называемые *упрочнителями*. Упрочнители имеют высокую прочность, твердость и модуль упругости. По типу упрочняющих наполнителей композиты подразделяют на *дисперсно-упрочненные, волокнистые и слоистые* (рис. 3.10).

В дисперсно-упрочненные композиты искусственно вводят мелкие, равномерно распределенные тугоплавкие частицы карбидов, оксидов, нитридов и т.д., не взаимодействующие с матрицей и не растворяющиеся в ней при нагревании вплоть до температуры

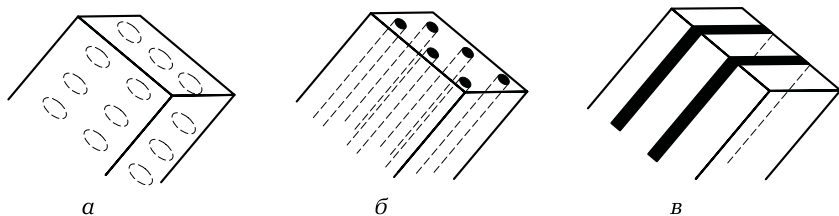


Рис. 3.10. Схемы строения композитов:

а — дисперсно-упрочненных; *б* — волокнистых; *в* — слоистых

плавления фаз. Чем мельче частицы наполнителя и меньше расстояние между ними, тем прочнее композит. В отличие от волокнистых в дисперсно-упрочненных композитах основным несущим элементом является матрица. Комплекс дисперсных частиц наполнителя упрочняет материал за счет сопротивления движению дислокаций при нагружении, что затрудняет пластическую деформацию. Эффективное сопротивление движению дислокаций создается вплоть до температуры плавления матрицы, благодаря чему дисперсно-

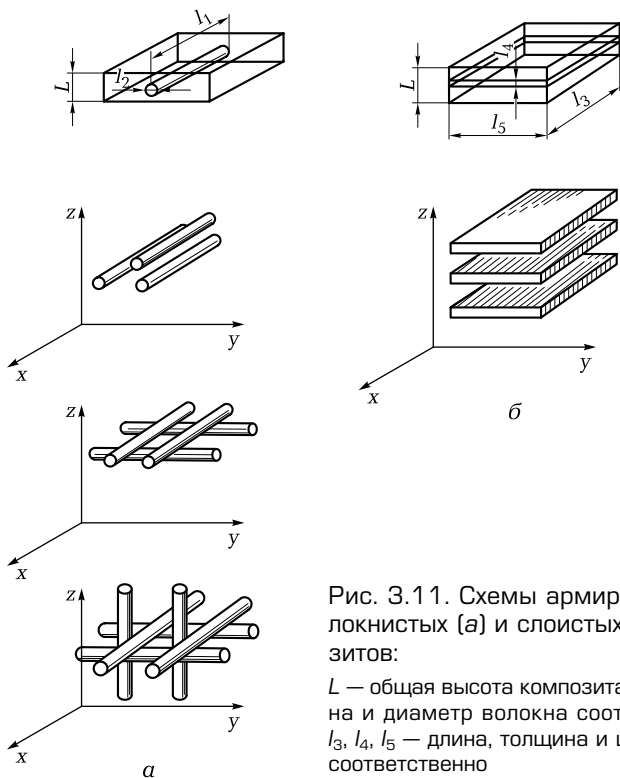


Рис. 3.11. Схемы армирования волокнистых *(а)* и слоистых *(б)* композитов:

L — общая высота композита; l_1, l_2 — длина и диаметр волокна соответственно; l_3, l_4, l_5 — длина, толщина и ширина слоя соответственно

упрочненные композиты отличаются высокой жаропрочностью и сопротивлением ползучести.

Арматурой в волокнистых композитах могут быть волокна различной формы: нити, ленты, сетки разного плетения. Армирование волокнистых композитов может осуществляться по одноосной, двухосной и трехосной схеме (рис. 3.11, а).

Прочность и жесткость таких материалов определяется свойствами армирующих волокон, воспринимающих основную нагрузку. Армирование дает большой прирост прочности, но дисперсное упрочнение технологически легче осуществимо.

Слоистые композиционные материалы (рис. 3.11, б) набирают из чередующихся слоев наполнителя и матричного материала (типа «сэндвич»). Слои наполнителя в таких композитах могут иметь различную ориентацию. Возможно поочередное использование слоев наполнителя из разных материалов с разными механическими свойствами. Для слоистых композиций обычно используют неметаллические материалы.

3.3.2. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы

При дисперсном упрочнении частицы блокируют процессы скольжения в матрице. Эффективность упрочнения при условии минимального взаимодействия с матрицей зависит от вида частиц, их объемной концентрации, а также от равномерности распределения в матрице. Применяют дисперсные частицы тугоплавких фаз типа Al_2O_3 , SiO_2 , BN, SiC, имеющие малую плотность и высокий модуль упругости. Композиты чаще всего получают методом порошковой металлургии, важным достоинством которого является изотропность свойств в различных направлениях.

В промышленности обычно применяют дисперсно-упрочненные композиты на алюминиевой (реже никелевой) основе. Характерными представителями этого вида композитов являются материалы типа САП (спеченная алюминиевая пудра), которые состоят из алюминиевой матрицы, упрочненной дисперсными частицами оксида алюминия.

Алюминиевый порошок получают распылением расплавленного металла с последующим измельчением в шаровых мельницах до размера 1 мкм в присутствии кислорода. С увеличением длительности помола пудра становится мельче, в ней повышается содержание оксида алюминия. Дальнейшая технология производства изделий и полуфабрикатов из САП включает в себя холодное прессование, предварительное спекание, горячее прессование, прокатку или выдавливание спеченной алюминиевой заготовки в форме го-

товых изделий, которые можно подвергать дополнительной термической обработке.

Сплавы типа САП удовлетворительно деформируются в горячем состоянии, а сплавы с содержанием оксида алюминия 6...9% — и при комнатной температуре. Из этих сплавов холодным волочением можно получить фольгу толщиной до 0,03 мм. Такие материалы хорошо обрабатываются резанием и обладают высокой коррозионной стойкостью.

Марки САП, применяемые в России, содержат 6...23% оксида алюминия: САП-1 (6...9%), САП-2 (9...13%), САП-3 (13...18%). С увеличением объемной концентрации оксида алюминия возрастает прочность композита. При комнатной температуре его характеристики прочности таковы: САП-1 — $\sigma_B = 280$ МПа, $\sigma_{0,2} = 220$ МПа; САП-3 — $\sigma_B = 420$ МПа, $\sigma_{0,2} = 340$ МПа. Материалы типа САП обладают высокой жаропрочностью и превосходят по этому показателю все деформируемые алюминиевые сплавы. Даже при температуре 500 °С их временное сопротивление не менее 60...110 МПа. Жаропрочность объясняется тормозящим действием дисперсных частиц на процесс рекристаллизации. Характеристики прочности САП весьма стабильны.

Испытания длительной прочности сплава САП-3 в течение 2 лет практически не повлияли на уровень свойств при комнатной температуре, а также при нагреве до 500 °С. При температуре 400 °С прочность САП в 5 раз выше прочности стареющих алюминиевых сплавов.

Влияние температуры на механические свойства этих сплавов показано в табл. 3.5.

Таблица 3.5. Механические свойства сплавов типа САП в зависимости от температуры испытаний $T_{исп}$

$T_{исп}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_B, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\delta, \%$
20	380	265	7
100	315	235	6,5
200	235	190	5
300	175	155	3,5
400	130	120	2
500	105	105	2,5

Примечание. См. примеч. 1 к табл. 1.2, примеч. 2 к табл. 1.19.

Сплавы типа САП применяют в авиационной технике для изготовления деталей с высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью, работающих при температуре до 500 °С. Из них изготавливают штоки поршней, лопатки компрессоров, оболочки тепловыделяющих элементов и трубы теплообменников.

3.3.3. Волокнистые композиционные материалы

Помимо обеспечения прочности и монолитности конструкции матрица должна иметь необходимую пластичность и быть работоспособной в той температурной области, для которой предназначен композит.

Для изготовления композитов, применяемых при температуре ниже 200 °С, используют полимерные матрицы. К таким композициям относятся стеклопластики, армированные короткими стеклянными волокнами в матрице из полиэфирной смолы. Стеклопластики применяют для изготовления корпусов автомобилей, лодок, некоторых бытовых приборов. В качестве матриц также используют термореактивные полимеры, в которых поперечные связи между основными цепями формируют жесткую структуру с трехмерной сеткой. Такими полимерами являются эпоксидные смолы, которые благодаря поперечным связям имеют более высокую термостойкость.

На рис. 3.12 схематично показан способ изготовления волокнистого композита. Волокна сматывают с бобин, подвергают поверхностной обработке, улучшающей адгезию, протягивают в ванну, где их покрывают полимерной смолой. Смола скрепляет волокна в плоский жгут — ленту. Готовые ленты собирают в слоистый листовый материал (аналог фанеры) или же наматывают в более сложные формы. Собранный в листы или намотанный материал отверждают термической обработкой. Слои можно накладывать поочередно с разным направлением волокон и формировать в композите клетчатую структуру арматуры, что придает материалу жесткость.

Недостатком такого композита является отсутствие поперечного армирования в каждом отдельном слое и между слоями. Поэтому материал может расслаиваться. К тому же появившаяся трещина в объемном образце из такого композита легко распространяется между слоями. Для устранения этих недостатков изготавливают тканые композиты.

Для работы при более высоких температурах применяют металлические матрицы. Обычно используют металлы с малой плотностью, например алюминий, реже — магний, титан.

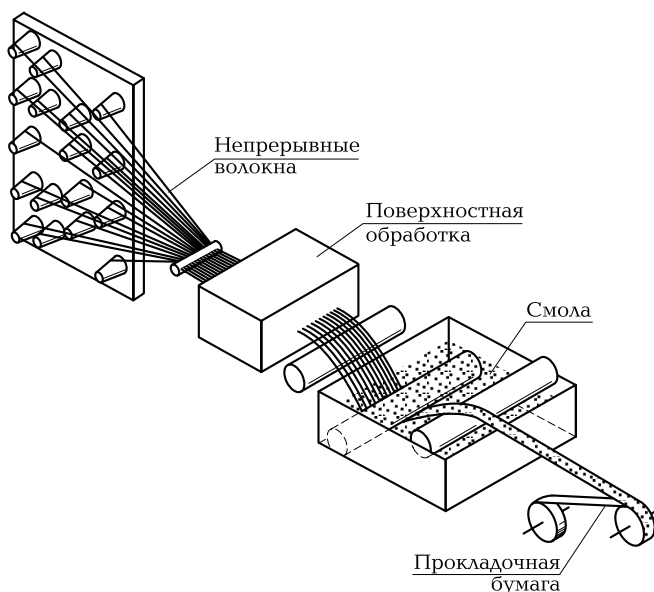


Рис. 3.12. Схема изготовления волокнистого композита

Металлические композиционные материалы (МКМ) имеют преимущества по сравнению с полимерными. Помимо более высокой рабочей температуры они характеризуются лучшей изотропией и большей стабильностью свойств в процессе эксплуатации, более высокой эрозионной стойкостью. Пластичность металлических матриц сообщает конструкции необходимую вязкость, что способствует быстрому выравниванию локальных механических нагрузок. Высокая теплопроводность МКМ предохраняет от локальных перегревов, что особенно важно для таких изделий, как наконечники ракет и ведущие кромки крыльев. Высокая электропроводность МКМ хорошо защищает их от электромагнитного излучения, молнии, снижает опасность статического электричества. Важным достоинством МКМ является более высокая технологичность процесса изготовления, формовки, термической обработки, формирования соединений и покрытий. Свойства основных металлических матриц представлены в табл. 3.6.

Для наиболее высоких рабочих температур в качестве матричного материала применяют керамику. Ее основной недостаток — отсутствие пластичности — в некоторой степени компенсируется армирующими волокнами, тормозящими распространение трещин в керамике. Использование в качестве матричного материала аморфного углерода, а в качестве армирующего материала волокон из кристаллического углерода (графита) позволило создать композит, выдерживающий нагрев до 2 500 °С. Такой углерод—углерод-

Таблица 3.6. Свойства основных металлических матриц

Матрица	$\gamma \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	σ_B , МПа	E , ГПа	$\alpha \cdot 10^6$, К ⁻¹
Al	2,63 ... 2,8	250 ... 573	69 ... 73	11 ... 13
Mg	1,74 ... 1,83	200 ... 280	43 ... 45	14 ... 15
Ni	4,5	500 ... 1 200	113	9 ... 10
Cu	8,94	220 ... 400	132	17 ... 18

Примечание. γ — плотность; σ_B — временное сопротивление; E — модуль упругости; α — температурный коэффициент линейного расширения.

ный композит перспективен для авиационной и ракетно-космической техники. Толчком к интенсивному использованию углерод—углеродных композитов в США послужили работы по программе создания космических кораблей многоразового использования. Недостаток углеродной матрицы состоит в возможном окислении и абляции. Для предотвращения этих явлений композит покрывают тонким слоем карбида кремния.

Таким образом, наиболее важным критерием выбора матричного материала является рабочая температура эксплуатации композита.

Помимо высокой прочности и жесткости основным требованием, предъявляемым к волокнам для композитов, является хорошее смачивание материала волокна расплавленной матрицей в процессе изготовления композита. При этом необходимо учитывать слабое взаимодействие волокна с материалом матрицы и его высокую окислительную стойкость.

Для армирования МКМ обычно используют непрерывные волокна: борные В, оксида алюминия Al_2O_3 , карбида кремния SiC, карбида бора B_4C , нитрида бора BN, диборида титана TiB_2 , оксида кремния SiO_2 , а также углеродные волокна УВ. Кроме того, в качестве волокон применяют металлическую тонкую проволоку, полученную методом волочения из стали, вольфрама, титана, молибдена и бериллия. Реже используют нитевидные специально выращенные кристаллы разных материалов.

Наибольшее распространение для армирования МКМ получили непрерывные или дискретные углеродные и борные волокна, свойства которых приведены в табл. 3.7. Волокна бора обычно получают осаждением бора из газовой фазы при диссоциации его галоидных соединений, например хлорида бора BCl_3 . Бор осаждается на основу из тонкой (12 мкм) вольфрамовой нити, нагретой до температуры 1 100 ... 1 200 °С. В процессе осаждения бор диффундирует в вольфрамовую основу, образуя бориды вольфрама в сердцевине волокна. Время пребывания волокна в реакционной камере составляет 1 ... 2 мин. Общий диаметр борного волокна — 100 ... 150 мкм.

Таблица 3.7. Свойства волокон для армирования металлических композитов

Тип волокна	Основа	$\gamma \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	$\sigma_{в}$, МПа	E , ГПа	$\alpha \cdot 10^6$, К ⁻¹
С	ПАН	1,7 ... 2	1,7 ... 3,2	170 ... 517	-1 ... -1,5
	Вискоза	1,6 ... 1,8	0,6 ... 3,2	400 ... 525	—
	Пек	2	1,1 ... 2,1	380 ... 700	-1,3
SiC	Вольфрам	3,15	3,1 ... 3,4	420 ... 450	3,8 ... 5
	УВ	3,05	3,45	400 ... 420	—
В	Вольфрам	2,49	3,52	400	4,8 ... 5
	УВ	2,25	3,32	380	—
В— SiC	Вольфрам	2,5	2,9	400	4,9
Al ₂ O ₃	—	3,9	3,9 ... 4,3	380 ... 500	8,5

Примечания: 1. См. примеч. к табл. 3.6.
2. ПАН — полиакрилонитрил; УВ — углеродное волокно.

Сырьем для получения высокопрочных и высокомодульных углеродных волокон являются такие полимеры с высоким содержанием углерода, как полиакрилонитрил (ПАН), реже пек и вискоза. Волокно ПАН выдавливают через малые отверстия и подвергают пиролизу в инертной атмосфере при температуре примерно 2 000 °С. Углеродные волокна выпускают в виде нитей, содержащих до 10 000 элементарных волокон, диаметр которых составляет 7 мкм. При нагреве до температуры 600 °С временное сопротивление и модуль упругости углеродного волокна не изменяются.

Композиты получают разными методами. К ним относятся пропитка пучка волокон жидкими расплавами алюминия и магния, плазменное напыление, применение методов горячего прессования, иногда с последующей гидроэкструзией или прокаткой заготовок. При армировании непрерывными волокнами композиций типа «сэндвич», состоящих из чередующихся слоев алюминиевой фольги и волокон, применяют прокатку, горячее прессование, сварку взрывом, диффузионную сварку. Отливку прутков и труб, армированных высокопрочными волокнами, получают из жидкометаллической фазы. Пучок волокон непрерывно проходит через ванну с расплавом и под давлением подпитывается жидким алюминием, магнием или жидкой смолой в случае изготовления полимерного материала. При выходе из пропиточной ванны волокна соединяются, затем их пропускают через фильеру, формирующую пруток или трубу. Этот метод обеспечивает максимальное наполнение компо-

зита волокнами (до 85 %), их однородное распределение в поперечном сечении и непрерывность процесса.

Для многих видов волокон разработаны технологические процессы нанесения покрытий для обеспечения лучшей смачиваемости, окалинстойкости и оптимального взаимодействия волокна с матрицей. Борные волокна защищают от реагирования с расплавами титана и алюминия созданием на поверхности диффузионного барьера из карбидов кремния или бора. Волокна бора, защищенные карбидом кремния, называют борсиком (borsic). Из-за высокой окислительной способности углеродных волокон на их поверхность наносят специальные покрытия, а процессы переработки осуществляют в защитной атмосфере.

Углеродные волокна имеют отрицательное значение α , благодаря чему появляется возможность при соответствующей укладке волокон получать α , близким к нулю.

Волокна карбида кремния получают методом химического осаждения из паровой фазы на подложку из борного или углеродного волокна. Такие волокна имеют хорошую теплостойкость, стойкость к окислению и мало реагируют с металлом.

3.3.4. Слоистые композиционные материалы

Материалами основы композитов со слоистым строением являются пластмасса, металл или керамика. В качестве наполнителей применяют полимерные волокна, ленты из тканей, трикотажа и других материалов. Хорошо известные ламинаты изготовлены из смол, армированных полимерными волокнами или стеклотканью. Слоистые композиционные материалы широко применяют в строительстве, машиностроении, мебельной промышленности, для изготовления спортивного снаряжения и т. д.

К этой же группе композитов относятся абляционные материалы для тепловой защиты ракет, изготовленные на основе фенолоформальдегидных смол с углеродным или стекловолокном. В этих материалах часто используют стеклоткань, которая при многослойном нанесении обеспечивает высокие механические свойства изделий, например тонкостенных труб, втулок и пр.

Встречаются композиты, в которых слоистым связующим являются алюминиевые, титановые, медные, никелевые и кобальтовые листы и фольга, а слоями, определяющими специальные свойства и применение, — керамика, интерметаллидные соединения или другие металлы.

Слоистые керамические композиты используют в экстремальных условиях. Компонентами этого типа композитов чаще всего яв-

ляются керамика, углерод и металлы, например корунд, пироли- тический графит, карбиды, оксиды, нитриды в сочетании с алюми- нием, медью, титаном, никелем, кобальтом, танталом, железом. Такие материалы нашли применение в космических аппаратах для изго- товления теплоизоляционных силикатных плиток из корунда, бо- росиликата, углеродных карборундовых ламинатов.

3.3.5. Свойства и применение композиционных материалов

Физико-механические свойства основных компонентов компо- зитов на основе алюминиевой матрицы приведены в табл. 3.8.

Хорошая совместимость матрицы с армирующим элементом, высокие прочностные свойства борного волокна и удовлетвори- тельная пластичность материала матрицы определяют высокие удельные значения прочности и жесткости МКМ в сочетании с хо-

Таблица 3.8. Свойства компонентов композитов на основе алюминиевой матрицы

Тип волокна	$\gamma \cdot 10^{-3}, \text{ кг/м}^3$	$\sigma_{\text{в}}, \text{ МПа}$	$E, \text{ ГПа}$	$\sigma_{\text{в}}/(\gamma g) \cdot 10^{-3}, \text{ М}$	$E/(\gamma g) \cdot 10^{-6}, \text{ М}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{ К}^{-1}$	$T_{\text{max}}, \text{ }^\circ\text{C}$
Матрица из алюминиевого сплава	2,63... 2,8	250...573	69...73	20	2,5	11... 13	150
C	2,1... 2,3	850/70	360/35	90	20	1... 3,6	500
B	2,6	1 800/330	250/140	70	10	6	540
SiC	2,85... 2,9	1 600/350	230/140	56	7	6,1	300
B—SiC	2,7... 2,8	1 400/320	220/180	50	—	—	—
Al ₂ O ₃	3,4	1 200	260/140	34	7	—	—

Примечания: 1. См. примеч. к табл. 3.6.

2. g — ускорение свободного падения; T_{max} — максимальная температура использо- вания композитов.

3. В числителе условной дроби — продольные значения прочностных характери- стик, в знаменателе — поперечные.

рошей технологичностью и конструкционной надежностью изделий из этого материала.

Для создания МКМ с еще более малой плотностью применяют магний. Композиты на основе магния на 30 % легче, чем сплавы алюминия, имеют хорошие удельные свойства, стабильное значение α в широком диапазоне температур, что достигается за счет комбинаций свойств матрицы и волокна и может регулироваться в зависимости от конкретных условий использования. Такие материалы можно получать литьем в виде плоских плит, труб, прутков и изделий специальной формы.

Магний — один из легких металлов, для которого не возникает проблем взаимодействия с углеродными, борными волокнами и волокнами из карбида кремния. Перспективная система углеродные волокна — магний обладает самыми высокими удельными характеристиками. Некоторые свойства МКМ на основе магниевой матрицы приведены в табл. 3.9. Системы углеродные волокна — алюминий и углеродные волокна — магний подходят для использования в авиационной и космической технике благодаря высоким значениям удельной прочности и жесткости, малому значению α и сравнительно высокой теплопроводности. Металлы с высокой пластичностью и прочностью хорошо совмещаются с высокопрочными и жесткими волокнами с низкой плотностью и пластичностью, образуя композиты с повышенной жесткостью и малой массой. Примером подобной комбинации может быть титан, армированный волокнами бора или карбида кремния. Однако такие системы имеют пониженную усталостную прочность из-за остаточных напряжений и химического взаимодействия между волокнами и матрицей при высокой температуре изготовления. Кроме того, механическая обработка композитов на основе титановой матрицы представляет большие трудности. Недостатком этого вида композитов является также высокая реакционная способность титановой матрицы. Свойства МКМ на основе титановой матрицы приведены в табл. 3.10.

Влияние температуры испытания на удельные прочность $\sigma_b/(\gamma g)$ и жесткость $E/(\gamma g)$ композитов показано на рис. 3.13.

На рис. 3.14 приведены свойства композита на основе алюминиевого сплава, армированного борным волокном (с покрытием карбидом кремния).

Прочность и модуль упругости, а также сопротивление материалов удару для однонаправленных композитов на основе алюминия, магния и титана повышаются по мере увеличения в композиции объемного содержания волокон.

Для очень высоких температур, наблюдаемых, например, в камерах сгорания реактивных двигателей, используют системы, содержащие молибденовую и вольфрамовую проволоку в матрицах из

Таблица 3.9. Свойства металлических композитов на основе магниевой матрицы

Материал	$\gamma \cdot 10^{-3}, \text{кг/м}^3$	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$E, \text{ГПа}$	$\sigma_{\text{в}}/(\gamma g) \cdot 10^{-3}, \text{м}$	$E/(\gamma g) \cdot 10^{-6}, \text{м}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	$T_{\text{max}}, \text{°C}$
Магниевые сплавы	1,74... 1,83	200... 280	43... 45	15,5	2,5	14... 15	—
Армирующие волокна:							
С	1,9... 1,95	825	352	115	23	—	300... 320
В	2,15	550	150	25	7	—	—
Al ₂ O ₃	2,5... 2,9	530	210	20	8	—	—

Примечание. См. примеч. к табл. 3.6, примеч. 2 и 3 к табл. 3.8.

Таблица 3.10. Свойства металлических композитов на основе титановой матрицы

Материал	$\gamma \cdot 10^{-3}, \text{кг/м}^3$	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$E, \text{ГПа}$	$\sigma_{\text{в}}/(\gamma g) \cdot 10^{-3}, \text{м}$	$E/(\gamma g) \cdot 10^{-6}, \text{м}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	$T_{\text{max}}, \text{°C}$
Титановые сплавы	4,5	500... 1 200	113	27	2,6	9	490
Армирующие волокна:							
В	3,3... 3,5	1 500/500	230	43	6,5	—	650
SiC	3,8... 4	1 720/650	250/220	46	7,5	—	700
В—SiC	3,7... 3,9	1 400/550	290/200	37	7,5	4,5... 4,7	—

Примечание. См. примеч. к табл. 3.6, примеч. 2 и 3 к табл. 3.8.

титана и суперсплавов. Наибольшей прочностью при температуре 1 093 °С обладает проволока из сплава W—Re—Hf—C: $\sigma_{\text{в}} = 2,2 \text{ ГПа}$, что в 6 раз больше прочности никелевых или кобальтовых суперсплавов при такой же температуре.

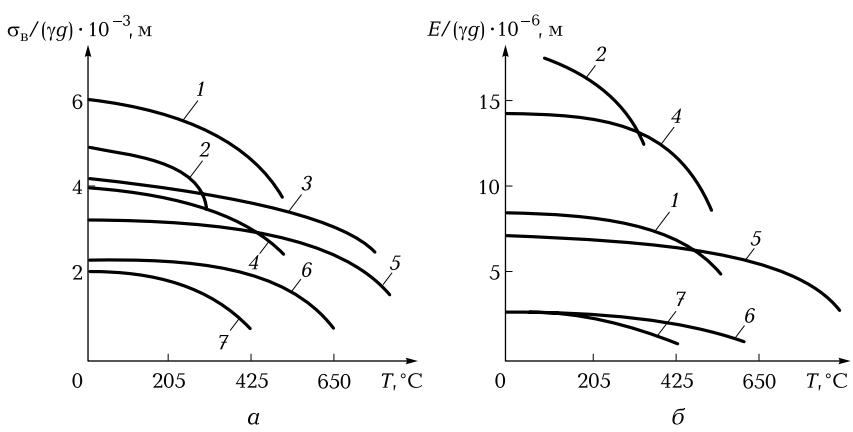


Рис. 3.13. Зависимость удельной прочности $\sigma_B/(\gamma g)$ (а) и удельной жесткости $E/(\gamma g)$ (б) от температуры T для материала:
 1 – В–Al; 2 – УВ–Mg; 3 – В–Ti; 4 – УВ–Al; 5 – SiC–Ti; 6 – Ti; 7 – Al; УВ – углеродное волокно

Большие перспективы открываются с развитием процессов объемного армирования МКМ. В частности, для МКМ объемное армирование дает существенный выигрыш в ударной вязкости. Система $Al_2O_3—Al$ трехмерного армирования поглощает почти такую же энергию удара, как и чистый металл. Армирование по толщине, обеспечиваемое трехмерной волокнистой структурой, предотвращает расслоение и ограничивает распространение трещин. К недостаткам МКМ относятся их сравнительно высокая стоимость, превосходящая стоимость ПКМ в несколько раз, и сложность изготовления. Совершенствование технологии позволит снизить себе-

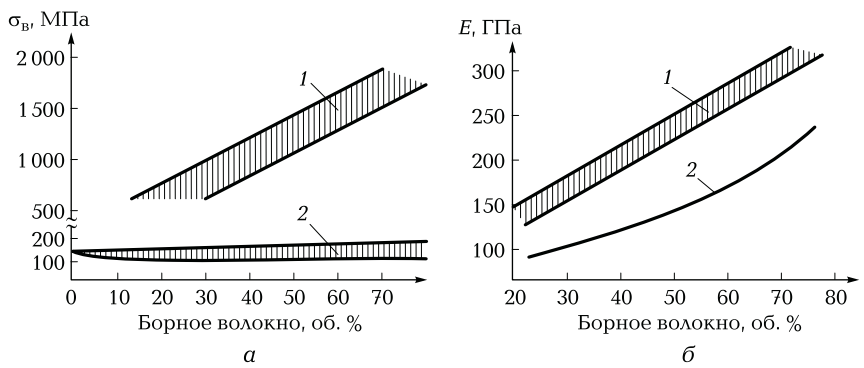


Рис. 3.14. Зависимость временного сопротивления σ_B (а) и модуля упругости E (б) бороалюминиевого композита вдоль [1] и поперек [2] оси армирования от объемного содержания борного волокна

стоимость МКМ, поскольку уникальные свойства делают их незаменимыми в ряде конструкций.

В авиационной и ракетно-космической технике наиболее широко используют композиты с борными волокнами. Детали из боропластика и бороалюминия применяют такие крупные фирмы, как Lockheed Martin, Boeing, General Dynamics. Из боропластика и бороалюминия изготавливают горизонтальные и вертикальные стабилизаторы, рули, элементы хвостового оперения, лонжероны, лопасти винтов, обшивку крыльев и др. Области использования МКМ непрерывно расширяются. Помимо улучшения технических характеристик многих ответственных изделий использование МКМ способно обеспечить 20...30%-ную экономию массы. Современные сплавы Al—Li имеют этот показатель на уровне 10...15% (рис. 3.15).

Детали из бороалюминия по сравнению с титановыми сплавами дают снижение массы на 30...40%, обеспечивая более высокую длительную и усталостную прочность при нагреве до 500 °С. Еще более эффективно применение бороалюминия в ракетно-космической технике. Его использование для изготовления крупных деталей ракет «Атлас», космических кораблей «Аполлон», «Шаттл» позволило уменьшить их массу на 20...50%. Это, в свою очередь, увеличило полезную нагрузку, а для военных самолетов — дальность полета, объем вооружения и т.д. Снижение полетной массы истребителя F-15 на 6%, или приблизительно на 1 100 кг, приводит к увеличению дальности полета на 15%.

Фирма Toyota (Япония) изготовила МКМ для деталей автомобилестроения. Алюминий армировали смесью коротких волокон оксидов алюминия Al_2O_3 и кремния SiO_2 (диаметр 3 мкм, длина до 10 мкм) в различных соотношениях. С увеличением массовой доли волокон Al_2O_3 возрастают прочность и модуль упругости, при росте доли волокон SiO_2 повышается износостойкость. Этот материал ис-

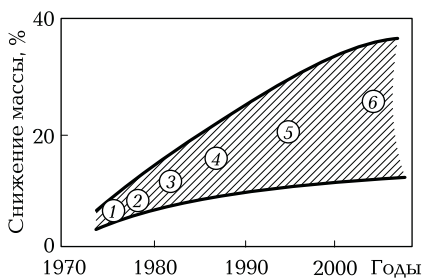


Рис. 3.15. Потенциальное снижение массы авиакосмических конструкций при использовании различных конструкционных материалов:

1, 2— алюминиевые сплавы; 3 — титановый сплав (Ti—10Al—2V—Fe); 4 — сплав Al—Li; 5 — порошковые материалы; 6 — металлические композиты

пользовали вместо никелевых сплавов для изготовления накладок поршней, что позволило повысить температуру в камере сгорания двигателя и его мощность. За счет увеличения износостойкости поршней пробег автомобиля увеличен до 300 тыс. км. Производство таких МКМ, по мнению японских специалистов, будет означать промышленное освоение технологии следующего поколения.

Правильный выбор материалов с целью экономии массы летательных аппаратов играет определяющую роль. Стоимость конструкции составляет 40 % для военных самолетов, 68 % — для коммерческих, 19 % — для космических аппаратов, 50 % — для орбитального космического корабля типа «Шаттл». В космической технике экономию массы принято оценивать через стоимость вывода 1 кг массы на орбиту с учетом числа запусков. Поскольку отношение исходной массы к массе, доставленной на околоземную орбиту, составляет 100 : 1, эта величина может достигать 30 тыс. долл./кг. Применение композитов в конструкции космического корабля «Шаттл» позволило снизить его массу на 1 402 кг, в том числе за счет использования боропластика — на 410 кг и боралюминия — на 82 кг. Такая экономия массы уменьшила затраты на вывод корабля на орбиту, что заранее окупило стоимость элементов конструкции из этих материалов.

3.4. ПЕНОАЛЮМИНИЙ

Пеноматериалы на основе алюминиевых сплавов представляют собой новый класс сверхлегких материалов ($\gamma = (0,1 \dots 1,5) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) с уникальным комплексом свойств, определяемых их структурой.

Пеноалюминий (ПАЛ) состоит из заполненных газом закрытых или частично открытых ячеек с тонкими металлическими стенками. Ячеистая структура пены обеспечивает материалу повышенную жесткость, прочность же в большей степени зависит от формы ячеек, т. е. от структуры порового пространства. Обычно пористость таких материалов составляет 80...95 %. Пеноалюминий обладает высокой степенью поглощения энергии удара: при 30 % деформации она составляет 5... 10 МДж/м³, поэтому очень перспективно его использование в конструкциях, предназначенных для защиты от удара, взрывной волны, осколков и т. д. При частотах 80... 1 600 Гц ПАЛ плотностью $(0,6 \dots 0,8) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ослабляет в 4—5 раз интенсивность звука. Особенно важны наряду с легкостью два свойства ПАЛ: негорючесть и экологическая чистота. Негорючесть этого материала обусловлена тем, что в его составе отсутствуют органические составляющие, а экологическая чистота ПАЛ и оксидных пленок на нем — высокой температурой их разложения (примерно 3 000 °С), которой в повседневной жизни нет, и низкими коэффици-

ентами диффузии любой примеси по оксидам ($10^{-12} \dots 10^{-17}$ м/с), поэтому они стабильны. Кроме того, ПАЛ является бактерицидным материалом, так как нет бактерий и грибов, использующих в процессе своей жизнедеятельности металлы и их оксиды. Основные свойства ПАЛ в сравнении с другими материалами приведены в табл. 3.11.

В настоящее время существуют две технологические схемы получения ПАЛ: вспенивание расплава и порошковая технология.

При *порошковой технологии* в качестве исходных материалов используют порошки алюминия, порофора, а также добавки частиц тугоплавких соединений. В этом случае может быть получен пенокомпозит, так как в качестве добавок используются частицы SiC, Al₂O₃ и другие, стабилизирующие структуру пены.

Способ изготовления пористых материалов из порошков алюминиевых сплавов позволяет получать крупногабаритные полуфабрикаты требуемой формы методом деформации (штамповка, про-

Таблица 3.11. Физико-механические свойства ПАЛ в сравнении с другими материалами

Свойства	ПАЛ-1	Алюмо-пено-композит	Алюминий АД31	Древесно-стружечные плиты
Плотность $\gamma \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	0,3... 1,0	0,3... 1,0	2,7	0,25... 1,1
Гигроскопичность, % (от массы)	1,0... 3,0	1,0... 2,0	—	4,0... 6,0
Временное сопротивление σ_v , МПа	45	52	150... 250	0,4... 3,5
Предел прочности при изгибе $\sigma_{из}$, МПа	24	28	80... 100	0,5
Отношение σ_v/γ	5,6	6,1	5,5... 9,5	1,6... 3,2
Модуль Юнга μ , МПа	45 000	47 000	70 000	107
Теплопроводность λ , Вт/(м · К)	4,0... 5,0	3,8... 4,5	140,0	0,3
Электропроводность j , мОм/м	0,2	0,25	30,0	$3 \cdot 10^{-6}$
Звукопроводность $\eta \cdot 10^{-2}$, дБ/м	1,1	1,0	50,0	2,4
Момент сопротивления на изгиб $S \cdot 10^4$, кг · м ²	106	180	230	35

катка, прессование) с последующим вспениванием их до нужной плотности.

Эта технология отличается меньшей энергоемкостью, широкой номенклатурой и большими габаритами изделий, высокой производительностью, универсальностью применяемого оборудования.

Технология изготовления полуфабрикатов порошковым методом развита достаточно хорошо, и в настоящее время этим способом можно получать следующую номенклатуру полуфабрикатов (толщина × ширина × длина): листы (4... 10) × 1 000 × 2 000 мм, плиты (10... 100) × 1 000 × 2 000 мм, полосы (20... 100) × 350 × 4 000 мм, прутки диаметром до 100 мм.

Технология получения пеноматериалов на основе алюминия из расплава (литейная технология) основывается на том, что в расплав материала вводят газообразный компонент, который под действием температуры увеличивается в объеме и вспенивает расплав.

Наиболее перспективным является использование технологии вспенивания расплава применительно к материалам на основе алюминиевых сплавов, содержащих дисперсные армирующие частицы, такие как SiC, Al₂O₃ и т. д.

Данная технология отличается высокой производительностью и технологичностью и может вписаться в существующие технологические схемы передела алюминиевого производства.

Имеется два основных способа получения ПАЛ по литейной технологии. Первый способ: через расплав композиционного материала пропускают поток газа в виде пузырьков (например, воздуха, CO₂, инертного газа), которые вспенивают расплав. Второй способ: в расплав вводят в виде порошка путем принудительного замешивания компонент — порообразователь (TiH₂, CaCO₃, BaCO₃, AgNO₃ и т. д.), который при термическом воздействии разлагается с выделением газа, и образующийся газ вспенивает расплав.

Дальнейшие операции по получению изделий из ПАЛ для обоих способов вспенивания расплава одинаковы и состоят в дополнительном кратковременном подогреве пены, когда это необходимо по технологии, транспортировке готовой пены, придании ей требуемой формы и охлаждении.

Принципиально новыми являются разработки в направлении изготовления полуфабрикатов из ПАЛ: введение в состав материала керамических частиц SiC, Al₂O₃ и лакирование материала алюминиевыми сплавами или титаном.

Введение в порошковую смесь керамических частиц SiC, Al₂O₃ позволяет получить новый класс материалов — алюмопенокомпозиты. Они обладают более высокими механическими свойствами, чем ПАЛ, и отвечают требованиям по ресурсным характеристикам (жесткость, изгиб), предъявляемым к традиционным конструкционным материалам.

Основными преимуществами алюмокомпозитов по сравнению с органическими пеноматериалами являются негорючесть, низкая гигроскопичность, нетоксичность.

Плакирование ПАЛ и алюмопенокомпозита алюминием или титаном в различных сочетаниях позволяет создать целую гамму конструкционных материалов с повышенными прочностными и пластическими характеристиками и возможностью проведения дополнительных операций деформирования (для случая плакировки из алюминия) и резко увеличить термостойкость алюмопенокомпозита или ПАЛ до температуры, меньшей или равной 950 °С (для случая плакировки из титана). Варьируя толщиной плакирующего слоя можно изготавливать гамму пеноматериалов с различной плотностью.

В табл. 3.12 представлены сравнительные весовые характеристики конструкций из различных материалов, причем эти конструкции имеют одинаковую жесткость.

Приведенные данные показывают, что конструкцию из стального листа толщиной 0,8 мм можно заменить листом из пеноалюминия с плотностью $0,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и толщиной 4,5 мм, конструкция будет иметь такую же жесткость, как и у стального листа, при этом легче его в 6,24 раза.

Для испытаний на прочность при изгибе и угол загиба из плит слоистого пеноалюминия с плакировкой из алюминия и титана, а также из алюмопенокомпозита вырезали образцы размером 200×300 мм. Результаты испытаний приведены в табл. 3.13. Как следует из представленных данных, разработанные новые пеноматериалы показывают повышенные характеристики по сравнению с ПАЛ.

Проведенные испытания с определением прочности на изгиб показали, что при сохранении плотности материала в пределах до

Таблица 3.12. Сравнительные весовые характеристики конструкций из различных материалов при одинаковой жесткости

Материал	Плотность $\gamma \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	Толщина листа, мм	Масса 1 м ² , кг
Сталь	7,8	0,8	6,24
Алюминий	4,5	1,2	3,24
Дерево	0,7	2,0	1,4
ПАЛ-1	0,7	2,0	1,4
ПАЛ-2	0,3	5,0	1,15
Алюмопенокомпозит	0,3	4,5	1,0

Таблица 3.13. Свойства пеноматериалов на основе алюминия

Материал	Толщина, мм	Плотность $\gamma \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	Угол загиба α , ...°	Прочность при изгибе $\sigma_{из}$, МПа
Пеноалюминий	12,0	0,6	10 ... 12	21 ... 28
Пеноалюминий с лакирующим слоем толщиной 0,8 мм (АД0)	11,5	0,9	20 ... 25	37 ... 52
Пеноалюминий, лакированный титаном толщиной 0,35 мм (ВТ1-0)	21	0,46	—	25 ... 53
Алюмопенокомпозит	10	0,6	10 ... 15	23 ... 29

10^3 кг/м³ прочность на сжатие возрастает в 4—5 раз, т. е. лакированный ПАЛ имеет резерв работоспособности при больших нагрузках по сравнению с ПАЛ. Введение частиц SiC (алюмопенокомпозит) позволяет при одной и той же плотности повысить прочность при сжатии в 2—4 раза. Кроме того, введение частиц SiC в состав ПАЛ значительно повышает его свойства при повышенных температурах.

Для соединения между собой модульных элементов из ПАЛ и из алюмопенокомпозита необходимы законцовки на каждом элементе. Эти законцовки получают путем сварки плавлением или сварки давлением.

Разработаны типовые конструктивно-технологические схемы законцовок для последующего соединения модульных элементов из алюмопенокомпозита. Одни варианты законцовок выполняют контактной точечной сваркой по предварительно обжатой кромке алюмопенокомпозита. Другие — ручной или механизированной аргонодуговой сваркой. Применение таких законцовок обеспечивает быстрое и качественное соединение типовых модульных элементов в любую конструкцию.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как получают порошковые материалы?
2. Что такое порошок, гранула, пудра?
3. Опишите технологический процесс изготовления изделий из порошковых материалов.

4. Какая дополнительная обработка требуется для изделий, изготовленных из порошков?
5. Как маркируют порошковые материалы на основе железа?
6. В чем особенность фильтров, изготовленных из порошков?
7. Перечислите свойства компонентов композиционных материалов.
8. Каково строение композиционных материалов?
9. Что является матрицей в композиционных материалах?
10. Какие наполнители используют для упрочнения композиционных материалов?
11. Что представляют собой материалы типа САП?
12. Какое влияние на свойства композиционного материала оказывают волокна бора?
13. Какими способами получают композиционные материалы?
14. В каких областях промышленности применяют композиционные материалы?

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

4.1. СВАРОЧНАЯ ПРОВОЛОКА

В большинстве случаев сварки плавлением и при всех наплавочных работах в расплавляемый основной металл вводится добавочный, наплавляемый; в результате их смешивания образуется сварочная ванна. Введение добавочного металла осуществляется посредством расплавления сварочным источником теплоты специальных сварочных материалов, которые могут быть энергетически связанными с источником теплоты (дуговая сварка плавящимся электродом и электрошлаковая сварка токоведущим электродом) либо автономными, непосредственно не связанными с источниками теплоты (газовая сварка, сварка неплавящимся электродом).

При газовой сварке и наплавке пламя используется для разогрева основного металла или же для нагрева основного и расплавляемого добавочного (присадочного) металла. Соотношения количеств расплавляемого основного и присадочного металлов при таком процессе могут изменяться в более широких пределах.

При ручных способах сварки и наплавки как при дуговой сварке плавящимся электродом, так и при сварке с автономным введением присадки (газовая, аргонодуговая сварка) размеры электродов (или присадки), в том числе и их длина, ограничиваются удобством управления ими, а иногда и особенностями их плавления, связанными с режимом источника теплоты. 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 и 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 часто для плавящихся электродов при дуговой сварке, токоведущих электродов при электрошлаковых процессах и в каче-

стве присадок при других способах сварки используют проволоку, полученную горячей прокаткой — катанку, либо волочением после горячей прокатки. Поперечное сечение такой проволоки обычно представляет собой круг.

Для электрошлаковой сварки кроме 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.

Сварочная проволока из стали. При сварке сталей в основном используют холодотянутую стальную сварочную проволоку по ГОСТ 2246 — 70 «Проволока стальная сварочная. Технические условия», который предусматривает изготовление проволоки 75 марок. В зависимости от уровня легирования сварочная проволока по ГОСТ 2246 — 70 подразделяется на низкоуглеродистую, легированную и высоколегированную. Низкоуглеродистую проволоку изготавливают шести марок, высоколегированную — 39 марок.

В зависимости от назначения стальную сварочную проволоку подразделяют на проволоку для сварки (наплавки) и проволоку для изготовления электродов (к обозначению добавляется буква «Э»). Подразделение по назначению обусловлено более жесткими предельными отклонениями к диаметру проволоки для изготовления электродов.

По виду поверхности низкоуглеродистую и легированную проволоку подразделяют на неомедненную и омедненную (к обозначению добавляется буква «О»). Специальные требования к омеднению поверхности проволоки (включая суммарное содержание меди) определяются техническими условиями.

По требованию потребителя проволока должна изготавливаться из стали, выплавленной электрошлаковым (Ш) или вакуумно-дуговым (ВД) переплавом либо в вакуумно-индукционных печах (ВИ). При этом дополнительные требования к металлу проволоки (ужесточение норм по содержанию вредных и посторонних примесей, введение ограничений по содержанию газов, неметаллических включений и т. п.) устанавливаются соглашением сторон.

В условном обозначении сварочной проволоки указывают диаметр и марку проволоки, приведенные выше индексы, характеризующие способ выплавки стали, назначение и вид поверхности проволоки, а также обозначение стандарта.

В низкоуглеродистой проволоке марок Св-08ГА, Св-10ГА и Св-10Г2 и легированной проволоке (не легированной алюминием) остаточное содержание алюминия не должно превышать 0,05 %.

Химический состав проволок, поставляемых по ГОСТ 2246 — 70, приведен в табл. 4.1.

Условные обозначения марок проволоки состоят из букв «Св» (сварочная) и следующих за ними цифр и букв. Цифры, следующие

за буквами «Св», указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Химические элементы, содержащиеся в металле проволоки, обозначены следующими буквами: А — азот (только в высоколегированной проволоке); Б — ниобий; В — вольфрам; Г — марганец; Д — медь; М — молибден; Н — никель; С — кремний; Т — титан; Ф — ванадий; Х — хром; Ц — цирконий; Ю — алюминий. Цифры, следующие за буквенными обозначениями химических элементов, указывают среднее содержание элемента в процентах. После буквенного обозначения элементов, содержащихся в небольших количествах, цифры не проставляются. Буква «А» в конце обозначения марок низкоуглеродистой и легированной проволоки указывает на повышенную чистоту металла по содержанию серы и фосфора. В проволоке марки Св-08АА сдвоенная буква «А» указывает на пониженное содержание серы и фосфора по сравнению с проволокой марки Св-08А.

Проволоку с неомедненной поверхностью поставляют свернутой в мотки. Размеры и масса мотков должны соответствовать данным, представленным в табл. 4.2.

Проволоку с омедненной поверхностью поставляют в мотках прямоугольного сечения. Для проволок диаметром 1,6...3,0 мм требуемые размеры мотков оговаривают в заказе. Проволока в мотках (катушках, кассетах) должна состоять из одного отрезка, свернутого неперепутанными рядами и плотно увязанного таким образом, чтобы исключить возможность распушивания или разматывания мотка.

Поверхность проволоки должна быть чистой и гладкой, без трещин, расслоений, плен, закатов, раковин, забоин, окалины, ржавчины, масла и других загрязнений. На поверхности проволоки допускаются риски (в том числе затянутые), царапины, местная рябизна и отдельные вмятины. Глубина указанных пороков не должна превышать предельного отклонения по диаметру проволоки.

С согласия потребителя проволоку марок Св-18ХГС и Св-18ХМА для предохранения от коррозии разрешается покрывать сплошным слоем нейтральной смазки, хорошо растворимой в бензине.

Высоколегированная проволока должна поставляться в травленном и отбеленном состоянии или после термической обработки в инертной атмосфере со светлой, светло-матовой или серой поверхностью, без всяких следов смазки.

Сварочная проволока из алюминия и алюминиевых сплавов.

При сварке плавлением алюминия и его сплавов в основном используют тянутую и прессованную сварочную проволоку из алюминия и алюминиевых сплавов по ГОСТ 7871 — 75 «Проволока сварочная из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия», который предусматривает изготовление проволоки 14 марок. Химический состав основных марок проволок для сварки алюминия и алюминиевых сплавов приведен в табл. 4.3.

Таблица 4.1. Химический состав проволок для сварки сталей

Марка проволоки	Массовая доля компонентов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	S	P	Прочие
								не более		
<i>Низкоуглеродистая проволока</i>										
СВ-08	≤ 0,10	≤ 0,03	0,35... 0,60	≤ 0,15	≤ 0,30	—	—	0,040	0,040	Al ≤ 0,01
СВ-08А	≤ 0,10	≤ 0,03	0,35... 0,60	≤ 0,12	≤ 0,25	—	—	0,030	0,030	Al ≤ 0,01
СВ-08АА	≤ 0,10	≤ 0,03	0,35... 0,60	≤ 0,10	≤ 0,25	—	—	0,020	0,020	Al ≤ 0,01
СВ-08ГА	≤ 0,10	≤ 0,06	0,80... 1,10	≤ 0,10	≤ 0,25	—	—	0,025	0,030	—
СВ-10Г4	≤ 0,12	≤ 0,06	1,10... 1,40	≤ 0,20	≤ 0,30	—	—	0,025	0,030	—
СВ-10Г2	≤ 0,12	≤ 0,06	1,50... 1,90	≤ 0,20	≤ 0,30	—	—	0,030	0,030	—
<i>Легированная проволока</i>										
СВ-08ГС	≤ 0,10	0,6... 0,85	1,4... 1,7	≤ 0,20	≤ 0,25	—	—	0,025	0,030	—
СВ-12ГС	≤ 0,14	0,6... 0,9	0,8... 1,1	≤ 0,20	≤ 0,30	—	—	0,025	0,030	—

СВ-08Г2С	0,05... 0,11	0,7... 0,85	1,8... 2,1	≤ 0,20	≤ 0,25	—	—	0,025	0,030	—
СВ-10ГН	≤ 0,12	0,15... 0,35	0,9... 1,2	≤ 0,20	0,9... 1,2	—	—	0,025	0,030	—
СВ-08ГСМТ	0,06... 0,11	0,4... 0,7	1...1,3	≤ 0,30	≤ 0,30	0,2... 0,4	0,05... 0,12	0,025	0,030	—
СВ-15ГСТЮЦА	0,12... 0,18	0,45... 0,85	0,6...1	≤ 0,30	≤ 0,40	—	0,05... 0,2	0,025	0,025	0,2...0,5 Al; 0,05...0,15 Zr; Ce ≥ 0,06
СВ-20ГСТЮА	0,17... 0,23	0,6... 0,8	0,9... 1,2	≤ 0,30	≤ 0,40	—	0,1... 0,2	0,025	0,025	0,2...0,5 Al; 0,3...0,5 Ce
СВ-18ХГС	0,15... 0,22	0,9... 1,2	0,8... 1,1	0,8... 1,1	≤ 0,30	—	—	0,025	0,030	—
СВ-10НМА	0,07... 0,12	0,12... 0,35	0,4... 0,7	≤ 0,20	1...1,5	0,4... 0,55	—	0,025	0,020	—
СВ-08МХ	0,06... 0,1	0,12... 0,3	0,35... 0,6	0,45... 0,65	≤ 0,30	0,4... 0,6	—	0,025	0,030	—
СВ-08ХМ	0,08... 0,1	0,12... 0,3	0,35... 0,6	0,9... 1,2	≤ 0,30	0,5... 0,7	—	0,025	0,030	—
СВ-18ХМА	0,15... 0,22	0,12... 0,35	0,4... 0,7	0,8... 1,1	≤ 0,30	0,15... 0,3	—	0,025	0,025	—
СВ-18ХНМ	≤ 0,10	0,12... 0,35	0,5... 0,8	0,7... 0,9	0,8..1,2	0,25... 0,45	—	0,025	0,030	—

Марка проволоки	Массовая доля компонентов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	S	P	Прочие
								не более		
СВ-08ХМФА	0,08... 0,1	0,12... 0,3	0,35... 0,6	0,9... 1,2	≤ 0,30	0,5... 0,7	—	0,025	0,025	0,15...0,3 V
СВ-10ХМФТ	0,07... 0,12	≤ 0,35	0,4... 0,7	1,4... 1,8	≤ 0,30	0,4... 0,6	0,05... 0,12	0,030	0,030	0,20...0,25 V
СВ-08ХГ2С	0,05... 0,11	0,7... 0,96	1,7... 2,1	0,7...1	≤ 0,25	—	—	0,025	0,03	—
СВ-08ХГСМА	0,06... 0,1	0,45... 0,7	1,15... 1,45	0,85... 1,15	≤ 0,30	0,4... 0,6	—	0,025	0,025	—
СВ-10ХГ2СМА	0,07... 0,12	0,6... 0,9	1,7... 2,1	0,8... 1,1	≤ 0,30	0,4... 0,6	—	0,02	0,02	—
СВ-08ХГСМФА	0,06... 0,1	0,45... 0,7	1,2... 1,8	0,95... 1,25	≤ 0,30	0,5... 0,7	—	0,02	0,02	0,2...0,25 V
СВ-04Х2МА	≤ 0,06	0,12... 0,35	0,4... 0,7	1,8... 2,2	≤ 0,25	0,5... 0,7	—	0,02	0,02	—
СВ-13Х2МФТ	0,10... 0,15	≤ 0,35	0,4... 0,7	1,7... 2,2	≤ 0,30	0,4... 0,6	0,05... 0,12	0,03	0,03	0,20...0,25 V
СВ-08Х3Г2СМ	≤ 0,10	0,45... 0,75	2...2,5	2...3	≤ 0,30	0,3... 0,5	—	0,03	0,03	—

СВ-08ХМНФБА	0,06... 0,1	0,12... 0,3	0,35... 0,6	1,10... 1,4	0,65... 0,9	0,8... 1	—	0,02	0,02	0,2... 0,35 V; 0,16... 0,23 Nb
СВ-08ХН2М	≤ 0,10	0,12... 0,3	0,55... 0,85	0,7... 1	1,4... 1,8	0,2... 0,4	—	0,02	0,03	—
СВ-10ХН2ГМТ	0,07... 0,12	0,12... 0,3	0,8... 1,1	0,3... 0,6	1,8... 2,2	0,4... 0,6	0,05... 0,12	0,02	0,03	—
СВ-08ХН2ГМТА	0,09... 0,11	0,12... 0,3	0,8... 1,1	0,25... 0,45	2,1... 2,8	0,25... 0,45	0,05... 0,12	0,02	0,03	—
СВ-08ХН2МЮ	0,09... 0,11	0,25... 0,55	1... 1,4	0,7... 1,1	2... 2,5	0,4... 0,75	—	0,02	0,03	0,06... 0,18 Al
СВ-08ХН2Г2СМЮ	0,09... 0,11	0,4... 0,7	1,5... 1,9	0,7... 1	2... 2,5	0,45... 0,65	—	0,02	0,03	0,06... 0,18 Al
СВ-08Н3	≤ 0,08	≤ 0,30	0,4... 0,7	≤ 0,30	3... 3,5	—	—	0,02	0,03	—
СВ-10Х5М	≤ 0,12	0,12... 0,35	0,4... 0,7	4... 5,5	≤ 0,30	0,4... 0,6	—	0,02	0,03	—
<i>Высоколегированная проволока</i>										
СВ-12ХЦНМФ	0,08... 0,15	0,25... 0,55	0,55... 0,65	10,5... 12	0,6... 0,9	0,6... 0,9	—	0,02	0,03	0,25... 0,5 V
СВ-10ХЦНВМФ	0,08... 0,13	0,3... 0,6	0,35... 0,65	10,5... 12	0,8... 1,1	1... 1,3	—	0,02	0,03	0,25... 0,5 V; 1... 1,5 W

Марка проволоки	Массовая доля компонентов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	S	P	Прочие
								не более		
СВ-13Х13	0,09... 0,14	0,3... 0,7	0,3... 0,7	12...14	≤ 0,6	—	—	0,02	0,03	—
СВ-20Х13	0,16... 0,24	≤ 0,6	≤ 0,6	12...14	—	—	—	0,02	0,03	—
СВ-08Х14	≤ 0,18	0,3... 0,7	0,3... 0,7	13...15	≤ 0,6	—	—	0,02	0,03	—
СВ-08Х14ГНТ	≤ 0,10	0,25... 0,65	0,9... 1,3	12,5... 14,5	0,4... 0,9	—	0,6...1	0,02	0,03	—
СВ-10Х17Т	≤ 0,12	≤ 0,8	≤ 0,7	16...18	≤ 0,6	—	0,2... 0,5	0,02	0,02	—
СВ-13Х25Т	≤ 0,15	≤ 1	≤ 0,8	23...27	≤ 0,6	—	0,2... 0,5	0,02	0,02	—
СВ-01Х19Н9	≤ 0,03	0,5...1	1...2	18...20	8...10	—	—	0,01	0,02	—
СВ-04Х19Н9	≤ 0,06	0,5...1	1...2	18...20	8...10	—	—	0,02	0,02	—
СВ-08Х16Н8М2	0,06... 0,1	≤ 0,6	1,5...2	15...17	7...9	1,5...2	—	0,02	0,03	—
СВ-08Х18Н8Г2Б	0,05... 0,1	0,3... 0,7	1,8... 2,3	17,5... 19,5	8...9	—	—	0,02	0,03	1,2...1,5 Nb
СВ-07Х18Н9ТЮ	≤ 0,09	≤ 0,8	≤ 2	17...19	8...10	—	1...1,4	0,02	0,02	0,6...0,75 Al
СВ-06Х19Н9Т	≤ 0,08	0,45...1	1...2	18...20	8...10	—	0,5...1	0,02	0,03	—

СВ-04Х19Н9С2	≤ 0,06	2... 2,75	1...2	18...20	8...10	—	—	0,02	0,03	—
СВ-08Х19Н9ФС2	≤ 0,10	1,3... 1,8	1...2	18...20	8...10	—	—	0,03	0,03	1,8...2,4 V
СВ-05Х19Н9Ф2С2	≤ 0,07	1,3... 1,8	1...2	18...20	8...10	—	—	0,03	0,03	2,2...2,7 V
СВ-07Х19Н10Б	0,06... 0,09	≤ 0,7	1,5...2	18,5... 20,5	9... 10,5	—	—	0,02	0,03	1,2...1,5 Nb
СВ-08Х18Н10Г2Б	0,05... 0,1	0,2... 0,45	1,8... 2,2	18,5... 20,5	9,5... 10,5	—	—	0,02	0,03	0,3...1,3 Nb
СВ-06Х19Н10М3Т	≤ 0,08	0,3... 0,8	1...2	18...20	9...11	2...3	0,5... 0,6	0,02	0,02	—
СВ-08Х19Н10М3Б	≤ 0,10	≤ 0,6	1...2	18...20	9...11	2...3	—	0,02	0,03	0,8...1,3 Nb
СВ-08Х19Н11М3	≤ 0,06	≤ 0,60	1...2	18...20	10...12	2...3	—	0,02	0,03	—
СВ-08Х20Н9ФБС	≤ 0,07	0,9... 1,5	1...2	18...20	8...10	—	—	0,02	0,03	1...1,4 Nb; 0,2...1,4 V
СВ-08Х20Н11М3ТБ	≤ 0,08	0,5...1	≤ 0,8	19...21	10...12	2,5...3	0,6... 1,1	0,02	0,03	0,8...0,9 Nb
СВ-10Х20Н15	≤ 0,12	≤ 0,8	1...2	19...22	14...16	—	—	0,02	0,02	—
СВ-07Х28Н12Г2Т	≤ 0,09	0,3...1	1,5... 2,5	24... 26,5	11...13	—	0,6...1	0,02	0,03	—
СВ-Х25Н12ТЮ	≤ 0,08	0,6...1	≤ 0,80	24... 26,5	11,5... 13,5	—	0,6...1	0,02	0,03	0,4...0,8 Al
СВ-07Х25Н13	≤ 0,09	0,8...1	1...2	23...26	12...14	—	—	0,02	0,03	—

Марка проволоки	Массовая доля компонентов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	S	P	Прочие
								не более		
СВ-08Х25Н13ВТЮ	≤ 0,10	0,8... 1	≤ 0,35	23...26	12... 14	—	0,5... 0,8	0,02	0,03	0,7... 1,1 Nb; 0,4... 0,9 Al
СВ-18Х25Н18	≤ 0,15	≤ 0,50	1... 2	23... 26,5	17... 20	—	—	0,02	0,03	—
СВ-06Х20Н19Г7Т	≤ 0,10	0,5... 1	5... 8	18,5... 22	8... 10	—	0,5... 0,9	0,02	0,04	—
СВ-08Х21Н10Г6	≤ 0,10	0,2... 0,7	5... 7	20... 22	9... 11	—	—	0,02	0,04	—
СВ-30Х25Н16Г7	0,25... 0,33	≤ 0,3	6... 8	24... 27	15... 17	—	—	0,02	0,03	—
СВ-10Х16Н25АМ6	0,12	≤ 0,60	1... 2	15... 17	24... 27	5,5... 7	—	0,018	0,025	0,2 N
СВ-08Х16Н25М6АФ	≤ 0,08	≤ 0,40	1... 2	15... 17	24... 27	5,5... 7	—	0,02	0,02	0,7... 1,4 V; 0,1... 0,2 N
СВ-01Х23Н28МЗДЗТ	≤ 0,03	≤ 0,55	≤ 0,55	22... 25	26... 29	2,5... 3	0,5... 0,9	0,02	0,03	2,5... 3,5 Cu
СВ-30Х15Н35В3БЗТ	0,27... 0,33	≤ 0,60	0,5... 1	14... 16	34... 36	—	0,2... 0,7	0,02	0,03	2,5... 3,5 W; 2,8... 3,5 Nb
СВ-08Н50	≤ 0,10	≤ 0,50	≤ 0,50	≤ 0,3	48... 53	—	—	0,02	0,03	—
СВ-06Х15Н60М15	≤ 0,08	≤ 0,50	1... 2	14... 16	Основа	14... 16	—	0,02	0,02	Fe ≤ 4

Таблица 4.2. Размеры и масса мотков проволоки

Диаметр проволоки, мм	Внутренний диаметр витков мотка проволоки, мм	Масса мотка проволоки, кг, не менее		
		низкоуглеродистой	легированной	высоколегированной
0,3; 0,5	150... 300	2	2	1,5
0,8	200... 350	5	5	3,0
1,0; 1,2	200... 400	20	15	10,0
1,4; 1,5	300... 600	25	15	10,0
1,6; 2,0	300... 600	30	20	15,0
2,5; 3,0	400... 600	40	30	20,0
4,0... 10,0	500... 750			
12,0	600... 800			

Примечание. Допускается поставка мотков массой, уменьшенной до 50 % от указанной в табл. 4.2, в объеме не более 10 % общей массы проволоки в партии.

После обработки проволока должна иметь блестящую поверхность с параметрами шероховатости $Ra < 2,5$ мкм (среднее арифметическое отклонение профиля) по ГОСТ 2789—73 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики». Внешний ряд намотанной проволоки должен быть на расстоянии 5... 7 мм от наружного края щек катушек диаметром 100 мм и на расстоянии 10... 12 мм от наружного края щек катушек диаметром 200; 300 и 430 мм.

Проволоку из сплавов марок СвА97, СвА85Т, СвА5 и СвАМц наматывают на катушки в нагартованном состоянии с временным сопротивлением разрыву не менее 100 МПа, а проволоку из сплавов марок СвАМг3, СвАМг5, Св1557, СвАМг6, СвАМг63, СвАМг61, СвАК5, СвАК5 и Св1201 по заказу потребителя наматывают в отожженном или нагартованном состоянии.

Проволока на катушках должна состоять из одного отрезка. Допускается стыковая сварка проволоки одной плавки, при этом необходимо, чтобы проволока в местах сварки удовлетворяла требованиям стандарта. Проволока в мотках должна иметь чистую поверхность, без плен, трещин, закатов, вмятин, заусенцев, расслоений и резких перегибов.

Катушки с проволокой помещают в полиэтиленовый мешок вместе с контрольным пакетом порошка обезвоженного силикагеля-индикатора и герметизируют при относительной влажности окружающего воздуха менее 20 % в течение 30 мин после химической обработки. Герметизированные полиэтиленовые мешки с катушками упаковывают в картонные, пластмассовые или деревянные ящики. Выбор марки присадочной проволоки для сварки распространенных алюминиевых сплавов осуществляется в соответствии с табл. 4.4.

Таблица 4.3. Химический состав проволок для сварки алюминия и его сплавов

Марка проволоки	Al, %	Массовая доля компонентов, %							
		легирующих							прочих, не более
		Mg	Mn	Fe	Si	Ti	Be	Zr	
СВА97	≥ 99,97	—	—	—	—	—	—	—	0,03
СВА85Т	Ост.	—	—	—	—	0,2...0,5	—	—	0,08
СВА5	≥ 99,5	—	—	0,2...0,35	0,1...0,25	—	—	—	0,05
СВАМЦ	Ост.	—	1,0...1,5	0,3...0,50	0,2...0,4	—	—	—	1,35
СВАМГ3	»	3,2...3,8	0,3...0,6	—	0,5...0,8	—	0,002... 0,005	—	0,85
СВАМГ4	»	4,0...4,8	0,5...0,8	—	0,05... 0,25 Cr	0,05...0,15	0,002... 0,005	—	1,15
СВАМГ5	»	4,8...5,8	0,5...0,8	—	—	0,1...0,2	0,002... 0,005	—	1,4
СВ1557	»	4,5...5,5	0,2...0,6	0,07... 0,15 Cr	—	—	0,002... 0,005	0,2...0,36	0,6
СВАМГ6	»	5,8...6,3	0,5...0,8	—	—	0,10...0,20	0,002... 0,005	—	1,2

СВАМг63	»	5,8...6,8	0,5...0,8	—	—	—	0,002... 0,005	0,15...0,35	1,15
СВАМг61	»	5,5...6,5	0,8...1,1	—	—	—	0,0001... 0,0003	0,002...0,12	1,15
СВАК5	»	—	—	—	4,5...6,0	0,1...0,2	—	—	1,2
СВАКЮ	»	—	—	—	7,0...10	—	—	—	1,1
СВ1201	»	0,6... 0,8 Сu	0,2...0,4	0,05...0,15 V	—	0,1...0,2	0,0001... 0,0008	0,1...0,25	0,3

Примечание. См. примеч. к табл. 1.18.

Таблица 4.4. Рекомендуемые марки присадочной проволоки для сварки алюминиевых сплавов

Марка свариваемого металла	Марка проволоки									
	СвА1	СвА85Т	СвА97	СвАМц	СвАМг3	СвАМг5	СвАМг6	СвАМг63	СвАК5	Св1557
АД00	—	Т; Пр; К; У	Пл	—	—	—	—	—	—	—
АД0	Т; Пр	К	Пл	—	—	—	—	—	—	—
АД1	У	—	—	—	—	—	—	—	—	—
АМц	—	—	—	Т; Пр; Пл; К; У	—	—	—	—	—	—
АМг3	—	—	—	—	Пл; К; У	—	Т; Пр	—	—	—
АМг4 АМг5	—	—	—	—	—	Пл	Т; Пр; У	—	—	К
АМг6	—	—	—	—	—	—	Пр	Т; Пл; У	—	К
АД33 АД31 АВ	—	—	—	—	—	—	—	—	Т; Пр; У	Пл; К
1915	—	—	—	—	—	Пл	Пр	Т	—	К; У

Примечание. Т — повышенная стойкость швов против горячих трещин; Пр — высокая прочность соединения; Пл — высокая пластичность соединения; К — повышенная коррозионная стойкость соединения; У — универсальная проволока, обеспечивающая удовлетворительные свойства соединения.

Сварочная проволока из меди и сплавов на ее основе. При сварке, наплавке и пайке меди и ее сплавов используют сварочные проволоку и прутки из меди и сплавов на медной основе по ГОСТ

Таблица 4.5. Химический состав проволоки и прутков для сварки меди и ее сплавов

Марка проволоки (прутка)	Cu, %	Массовая доля легирующих компонентов, %								
		Mn	Si	Fe	Ni	Sn	Ag	Ti	Cr	Zr
МСр1	98,5... 99	—	—	—	—	—	0,8... 1,2	—	—	—
МНЖКТ5-1-0,2-0,2	Ост.	0,3... 0,8	0,15... 0,3	1... 1,4	0,15... 0,5	—	—	0,1... 0,3	—	—
БрХ0,7	»	—	—	—	—	—	—	—	0,4... 1	—
БрНХТ	»	—	—	—	0,5... 0,8	—	—	0,05... 0,15	0,15... 0,35	—
БрНЦр	»	—	—	—	0,3... 0,5	—	—	—	—	0,4... 0,8
БрНЦрТ	»	—	—	—	0,5... 0,8	—	—	0,1... 0,2	—	1,4... 1,6
ЛК62-0,5*	60,5... 63,5	—	0,3... 0,7	—	—	—	—	—	—	—
ЛКБ062-0,2-0,5*	60,5... 63,5	—	0,1... 0,3	—	—	0,3... 0,7	—	—	0,01... 0,03 В	—
ЛОК59-1-0,3*	58... 60	—	0,2... 0,4	—	—	0,7... 1,1	—	—	—	—

Примечание. См. примеч. к табл. 1.18.

* В сплаве присутствует цинк.

16130—90 «Проволока и прутки из меди и сплавов на медной основе сварочные. Технические условия».

Сварочную проволоку по указанному стандарту изготавливают из меди и ее сплавов 17 марок: М1; М1р; МСр1; МНЖ5-1; МНЖКТ5-1-0,2-0,2; БрКМц3-1; БрОЦ4-3; БрАМц9-2; БрОФ6,5-0,15; БрАЖМц10-3-1,5; БрХ0,7; БрХНТ; БрНЦр; А63; ЛО60-1; АК62-0,5; АКБО62-0,2-0,04-0,5.

Химический состав проволоки и прутков для сварки меди и ее сплавов приведен в табл. 4.5.

Поверхность проволоки должна быть чистой и гладкой, без трещин и расслоений. Проволока поставляется мягкой (М), полутвердой (Пт) и твердой (Т). Проволока и прутки поставляются партиями. Каждая партия должна состоять из проволоки или прутков одной марки, одного диаметра и одного состояния поставки. Масса партии не должна превышать 1 000 кг.

Для сварки магниевых сплавов используют проволоку, полученную прессованием. Перед сваркой с поверхности проволоки удаляют оксидную пленку химическим травлением или электрополированием. Присадочный материал выбирают для сварки конкретного сплава (табл. 4.6).

При сварке никеля и его сплавов используют проволоку диаметром 3...5 мм Н-1 (ГОСТ 2179—75 «Проволока из никеля и кремнистого никеля. Технические условия») и НП-1, НП-2 (ГОСТ 492—2006 «Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые, обрабатываемые давлением. Марки»). В качестве присадочного металла применяют также проволоку из сплава НМц-2,5 и нихрома (Х20Н80) по ГОСТ 492—2006. Для сварки никеля разработаны специальные комплексно-легированные проволоки, содержащие титан, алюминий, марганец, кремний (ТУ 48-21-284—73 «Проволока сварочная марок НМцАТ3-1,5-0,6 и НМцТК1-1,5-2,5-0,15»).

Таблица 4.6. Выбор марки присадочного материала для сварки магниевых сплавов

Марка свариваемого сплава	Присадочный материал
МА1	МА1
МА2, МА2-1, МА8, МА9	МА2-1
МА13	МА13
МА11	4 % Nd; 0,5... 1,0 % La; 0,4...0,6 % Zr; 0,4 % Ag
МА14	4...5 % Zn; 0,6... 1,1 % Zr; 0,6...1,6 % РЗМ*

* РЗМ — редкоземельные металлы.

Таблица 4.7. Химический состав и механические свойства промышленных сварочных проволок из титановых сплавов

Марка проволоки	Массовая доля, %							других компо- нентов	$\sigma_{вг}$ МПа	δ , %
	легирующих компонентов и примесей									
	Al	V	Zr	Mo	N ₂	O ₂	H ₂			
					не более					
BT-00	—	—	—	—	0,04	0,10	0,003	0,1	440	25
BT2св	2...3	—	—	—	0,04	0,12	0,003	0,3	490	20
BT6св	3,5...4,5	2,5...3,5	—	—	0,04	0,12	0,003	0,3	686	18
СПТ-2	3,5...4,5	2,5...3,5	1...2	—	0,04	0,12	0,003	0,3	686	18
BT20-1св	2	1	2	1	—	—	—	—	589	15,0

Примечание. См. примеч. 1 к табл. 1.2, примеч. 2 к табл. 1.19.

Титановая сварочная проволока выпускается диаметром 1...7 мм. Проволока поставляется с чистой и осветленной металлической поверхностью, в травленном и дегазированном состоянии (содержание водорода не более 0,003 %). Проволока ВТ1-00 применяется для сварки технического титана, а также наряду с проволокой ВТ2св — для низколегированных α - и псевдо- α -сплавов; проволоки СПТ-2 и СП-15 — для высокопрочных ($\alpha + \beta$)-сплавов. Химический состав и механические свойства проволоки для сварки титановых сплавов приведены в табл. 4.7.

4.2. НАПЛАВОЧНАЯ СТАЛЬНАЯ ПРОВОЛОКА

При механизированной дуговой наплавке стальных деталей в основном используют горячекатаную и холоднокатаную стальную наплавочную проволоку по ГОСТ 10543—98 «Проволока стальная наплавочная. Технические условия», которая предусматривает изготовление углеродистой, легированной и высоколегированной проволоки. Проволока изготавливается из стали, химический состав которой в зависимости от марки проволоки приведен в табл. 4.8.

Условные обозначения марок проволоки состоят из букв «Нп» (наплавочная) и следующих за ними цифр и букв. Цифры, следующие за буквами «Нп», указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Цифры, следующие за буквенными обозначениями химических элементов, указывают среднее содержание элемента в процентах. После буквенного обозначения элементов, содержащихся в небольших количествах, цифры не проставляются.

Химические элементы, содержащиеся в металле проволок, обозначены: В — вольфрам; Г — марганец; М — молибден; С — кремний; Т — титан; Ф — ванадий; Х — хром.

Проволока диаметром свыше 2 мм должна выдерживать испытание на изгиб в холодном состоянии на 180° вокруг цилиндрического сердечника диаметром, равным пяти диаметрам испытываемой проволоки. Холоднотянутая проволока поставляется в нагартованном состоянии или термически обработанной.

В табл. 4.9 приведены твердость и примерное назначение металла, наплавленного проволокой конкретных марок.

4.3. ЧУГУННЫЕ ПРУТКИ ДЛЯ СВАРКИ И НАПЛАВКИ

Чугунные прутки для газовой сварки и наплавки изготавливают из серого чугуна. В зависимости от назначения чугунные прутки

Таблица 4.8. Химический состав стали проволоки для наплавки

Марка проволоки	Массовая доля, %									
	основных компонентов								примесей	
	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	V	Mo	S	P
									не более	
<i>Углеродистая сталь</i>										
Нп-25	0,22...0,30	0,5...0,8	0,17...0,37	$\leq 0,25$	$\leq 0,3$	—	—	—	0,04	0,04
Нп-30	0,27...0,35									
Нп-35	0,32...0,40									
Нп-40	0,35...0,45									
Нп-45	0,42...0,5									
Нп-50	0,45...0,55									
Нп-65	0,6...0,7									
Нп-80	0,75...0,85									
Нп-85	0,82...0,9									
<i>Легированная сталь</i>										
Нп-40Г	0,35...0,45	0,7...1	0,17...0,37	$\leq 0,3$	$\leq 0,3$	—	—	—	0,04	0,04
Нп-50Г	0,45...0,56									
Нп-65Г	0,6...0,7	0,9...1,2			—					

Марка проволоки	Массовая доля, %									
	основных компонентов								примесей	
	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	V	Mo	S	P
									не более	
Нп-30ХГСА	0,27 ... 0,35	0,8 ... 1,1	0,9 ... 1,2	0,8 ... 1,1	≤ 0,4	—	—	—	0,03	0,04
Нп-30Х5		0,4 ... 0,7	0,2 ... 0,8	4 ... 6						
Нп-40Х3Г2МФ	0,35 ... 0,45	1,3 ... 1,8	0,4 ... 0,7	3,3 ... 3,8	≤ 0,35	—	0,1 ... 0,2	0,3 ... 0,5	0,04	0,03
Нп-40Х2Г2М	0,35 ... 0,43			1,8 ... 2,3			1,8 ... 2,3	—		
Нп-55ХНМ	0,5 ... 0,6	0,5 ... 0,8	≤ 0,35	0,5 ... 0,8	1,4 ... 1,8	—	—	0,15 ... 0,3	0,03	0,03
Нп-50ХФА	0,46 ... 0,54		0,17 ... 0,37	0,8 ... 1,1	≤ 0,4		0,1 ... 0,2	—		
Нп-50Х6ФМС	0,45 ... 0,55	0,3 ... 0,6	0,8 ... 1,2	5,5 ... 6,5	≤ 0,35	—	0,35 ... 0,55	1,2 ... 1,6	0,04	0,04
Нп-105Х	0,95 ... 1,1	0,15 ... 0,4	0,15 ... 0,35	1,3 ... 1,65			—	—	0,03	0,03
<i>Высоколегированная сталь</i>										
Нп-20Х14	0,16 ... 0,25	≤ 0,8	≤ 0,8	13 ... 15	≤ 0,6	—	—	—	0,03	0,035
Нп-30Х13	0,25 ... 0,35			12 ... 14	—					
Нп-30Х10Г10Т	0,25 ... 0,35	10 ... 12	≤ 0,4	10 ... 12	≤ 0,35	—	—	0,15 ... 0,3 Ti	0,03	0,035
Нп-40Х13	0,35 ... 0,45	≤ 0,8	≤ 0,8	12 ... 14						

Нп-45Х4В3Ф	0,4...0,5	0,8...1,2	0,7...1	3,6...4,6		2,5...3	0,24...0,4	—	0,04	0,04
Нп-45Х2В8Т		1...1,4	0,4...0,7	2,2...3		8...9,5	0,3...0,5	0,05... 0,9 Ti		
Нп-60Х3В10Ф	0,55...0,65	1,3...1,8			2,6...3,6	≤ 0,35	9...10	0,3...0,5	—	
Нп-Г13А	1...1,2	12,5...14,5	≤ 0,4	≤ 0,6	≤ 0,6	—	—			0,030
Нп-Х15Н60	≤ 0,15	≤ 1,50	≤ 1,00	15...18	55...61				0,025	
Нп-20Н80Т	≤ 0,12	≤ 0,70	≤ 0,80	19...23	Ост.				0,15... 0,4 Ti	0,015

Примечание. См. примеч. к табл. 1.18.

Таблица 4.9. Твердость и примерное назначение наплавленного металла

Марка проволоки	Ориентировочная твердость наплавленного металла	Наплавляемые изделия
Нп-25	160 ... 200 НВ	Оси, шпиндели, валы
Нп-35		
Нп-40		
Нп-40		
Нп-45	170 ... 250 НВ	
Нп-50	180 ... 240 НВ	Натяжные колеса, скаты тележек, опорные ролики
Нп-65	220 ... 300 НВ	Опорные ролики, оси
Нп-80	260 ... 340 НВ	Коленчатые валы, крестовины карданов
Нп-40Г	180 ... 240 НВ	Оси, шпиндели, ролики, валы
Нп-50Г	200 ... 270 НВ	Натяжные колеса, опорные ролики гусеничных машин
Нп-65Г	230 ... 310 НВ	Крановые колеса, оси опорных роликов
Нп-30ХГСА	220 ... 300 НВ	Обжимные прокатные валки, крановые колеса
Нп-30Х5	37 ... 42 HRC	Прокатные валки сортопрокатных станов
Нп-40Х3Г2МФ	38 ... 44 HRC	Детали, испытывающие удары и абразивный износ
Нп-40Х2Г2М	54 ... 56 HRC после закалки	Детали машин, работающие с динамическими нагрузками (коленчатые валы, поворотные кулаки, оси опорных катков)
Нп-55ХМ	40 ... 50 HRC	Ковочные и вырубные штампы, валки капорных машин
Нп-50ХФА	43 ... 50 HRC	Шлицевые валы, коленчатые валы двигателей внутреннего сгорания
Нп-50Х6ФМС	42 ... 48 HRC	Валки трубопрокатных и сортопрокатных станов, обжимные прокатные валки, штампы горячей штамповки

Марка проволоки	Ориентировочная твердость наплавленного металла	Наплавляемые изделия
Нп-15Х	32... 38 HRC	Обрезные штампы холодной штамповки, валы смесителей. Уплотнительные поверхности задвижек для пара и воды
Нп-20Х14		
Нп-20Х13	38... 45 HRC	Плунжеры гидропрессов, шейки коленчатых валов, штампы
Нп-30Х10Г10Т	200... 220 НВ	Лопasti гидротурбин, гребные винты и валы морских судов
Нп-40Х13	45... 52 HRC	Опорные ролики тракторов и экскаваторов, деталей транспортеров
Нп-45Х4В3Ф	38... 45 HRC	Валки листопрокатных и сортопрокатных станов, штампы горячей штамповки
Нп-45Х2В8Т	40... 46 HRC	Ножи для резки горячего металла, прессовый инструмент
Нп-50Х3В16Ф	42... 50 HRC	Валки листопрокатных и сортопрокатных станов, штампы горячей штамповки
Нп-Г13А	200... 260 НВ	Железнодорожные крестовины, щеки дробилок, зубья ковшей
Нп-Х13Н60	180... 220 НВ	Детали реторт и печей, работающие при высокой температуре. Выхлопные клапаны автомобильных двигателей
Нп-Х20Н56Т		

подразделяются на следующие марки: А — для горячей газовой сварки; Б — для газовой сварки с местным нагревом и для электродных стержней; НЧ-1 — для низкотемпературной газовой сварки тонкостенных отливок; НЧ-2 — для низкотемпературной газовой сварки толстостенных отливок; БЧ и ХЧ — для износостойкой наплавки.

Размеры прутков всех марок должны соответствовать указанным в табл. 4.10.

Химический состав прутков должен соответствовать нормам, указанным в табл. 4.11. Увеличение содержания примесей хрома и никеля свыше указанных в данной таблице сопровождается образованием трещин в зоне сплавления сварного шва.

Таблица 4.10. Размеры прутков, мм

Диаметр		Длина	Стрела прогиба, не более
номинальный	предельные отклонения		
4	$\pm 0,6$	250	1,5
6	$\pm 0,8$	350	2,0
8... 10		450	3,0
12... 16	$\pm 1,0$		

Таблица 4.11. Химический состав прутков

Марка прутка	Массовая доля, %							
	основных компонентов						примесей, не более	
	C	Si	Mn	S	P	прочие	Cr	Ni
А	3,0... 3,5	3... 3,4	0,5... 0,8	$\leq 0,08$	0,2... 0,4	—	0,05	0,3
Б		3,5... 4						
НЧ-1		3... 3,4		$\leq 0,05$	0,2... 0,4	0,03... 0,08 Ti; 0,4... 0,6 Ni		—
НЧ-2		3,5... 4						
БЧ	2,5... 3	1... 1,5	0,2... 0,6		$\leq 0,01$	—	—	
ХЧ		1,2... 1,5						

Таблица 4.12. Твердость поверхности наплавленного слоя образца

Марка прутка	НВ, не более	HRC
А, Б	230	—
НЧ-1, НЧ-2	240	—
БЧ	—	44... 46
ХЧ	—	48... 52

Примечание. НВ — твердость по Бринеллю; HRC — твердость по Роквеллу.

На поверхности прутков не допускаются формовочная земля, пригар, шлак, ржавчина и другие загрязнения. Твердость поверхности наплавленного слоя образца должна соответствовать нормам, указанным в табл. 4.12.

4.4. ПОРОШКИ ДЛЯ НАПЛАВКИ

Для дуговой наплавки неплавящимся электродом износостойкого слоя на детали, работающие в условиях интенсивного абразивного изнашивания, используют механические смеси порошков. В зависимости от химического состава смеси порошки для наплавки разделены на марки: С-2М, ФБ Х6-2, БХ и КБХ.

Для смесей порошков должны выполняться следующие требования. Химический состав соответствует нормам, указанным в табл. 4.13, гранулометрический состав — нормам, указанным в табл. 4.14. Влажность не превышает 0,3 %. Насыпная плотность смесей и твердость наплавленного слоя удовлетворяют требованиям, представленным в табл. 4.15.

Области применения смесей порошков различных марок представлены в табл. 4.16.

Порошок в зависимости от гранулометрического состава изготавливают четырех классов: крупный (К), средний (С), мелкий (М) и очень мелкий (ОМ). Порошки упаковывают в банки массой не более 50 кг.

Таблица 4.13. Химический состав смеси порошков (основа — железо)

Марка порошка	Массовая доля, %						
	легирующих компонентов					примесей, не более	
	С	Cr	Si	Mn	В	S	P
С-2М	7 ... 10	24 ... 26	0,5...3	6...8,5	—	0,4	0,3
ФБХ6-2	3,5...5,5	28...37	1...2,5	2,5...5,5	1,8...2,2		
БХ	0,3...1	35...44	0,5...1	—	7...9	—	—
КБХ	4...6	42...52	0,5...1,4	—	0,7...0,9		

Таблица 4.14. Гранулометрический состав смесей порошков

Марка порошка	Величина частиц, мм, не более	Остаток на сите, %, не более				Прохождение через сито, %, не менее			
		Номер сеток							
		1,25	1,0	05	045	1,25	1,0	05	045
С-2М ФБХ-6-2 КБХ БХ	1,0	0	5	—	—	100	95	—	—
	0,45	—	—	0	5	—	—	100	95

Таблица 4.15. Плотность смесей порошков и твердость наплавленного слоя

Марка порошка	Насыпная плотность, 10 ³ кг/м ³	HRC
	не менее	
С-2М	2,7	54
ФБХ 6-2	2,3	53
БХ	2,4	63
КБХ	3,6	60

Примечание. См. примеч. к табл. 4.12.

Таблица 4.16. Области применения смесей порошков

Марка порошка	Области применения
С-2М	Наплавка бил дробильных аппаратов, ножей бульдозеров и грейдеров, ковшей экскаваторов и драг, шнеков кирпичных прессов, лопастей глиномешалок, катков, поддонов и отвалов бегунковых смесителей, коксовыталкивателей
ФБХ 6-2	Наплавка деталей горнодобывающего и торфоперерабатывающего оборудования, работающего в условиях интенсивного абразивного изнашивания с умеренной ударной нагрузкой
БХ	Наплавка лопастей глиномешалок, деталей кирпичных прессов, пресс-форм для брикетирования угля и торфа, лопастей вентиляторных дымососов, деталей земснарядов, колец дезинтеграторов
КБХ	Наплавка лопастей глиномешалок, деталей кирпичных прессов, пресс-форм для брикетирования угля и торфа, зубьев однокорпусных и роторных экскаваторов, ножей бульдозеров и грейдеров, лопастей вентиляторных дымососов, лопаток дробометов

Кроме проволок сплошного сечения применяют порошковую проволоку — непрерывный электрод диаметром 1,2...3,6 мм, состоящий из металлической оболочки и порошкового наполнителя (сыпучих материалов, ферросплавов и металлических порошков) (рис. 4.1). Металлическая оболочка — лента из низкоуглеродистой стали марки 08кп холодного проката в состоянии «мягкая» или «особо мягкая». Изготавливают порошковую проволоку на специальных станках непрерывным сворачиванием ленты в трубку с одновременным заполнением трубки порошком. Бесшовную проволоку изготавливают из трубки относительно небольшого диаметра, заполненной порошковой шихтой, методом волочения до требуемого диаметра.

Порошковые проволоки в зависимости от вида шихты сердечника используются с дополнительной защитой (обычно это углекислый газ) или без нее. Последние называют *самозащитными*. При сварке самозащитными проволоками защита расплавленного металла осуществляется за счет газо- и шлакообразующих элементов шихты сердечника. Как правило, без дополнительной защиты применяются рутил-органические, карбонатно-флюоритные и флюоритные проволоки. Проволоки рутилового и рутил-флюоритного типов используют для сварки в углекислом газе, эти проволоки называют также *газозащитными*. Типы порошковых проволок можно выбирать в зависимости от положения свариваемых стыков деталей в пространстве и требований к сварному соединению (табл. 4.17).

Применение порошковых проволок позволяет устранить повышенное разбрызгивание электродного металла — недостаток обычных стальных электродных проволок (например, Св-08Г2С) — и исключить операцию устранения налипших металлических брызг с поверхности изделия. Производительность полуавтоматической сварки порошковыми проволоками на 10...15 % выше, чем, например, проволокой Св-08Г2С в среде углекислого газа.

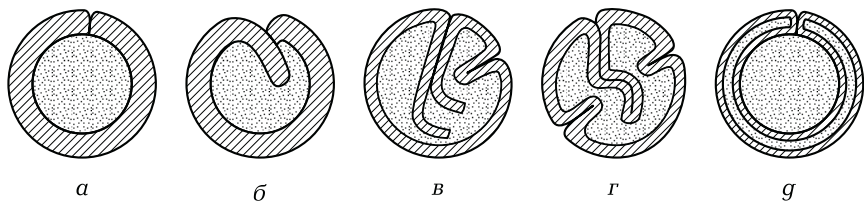


Рис. 4.1. Конструкции порошковой проволоки:

а, б — простые трубчатые; в, г — с одним загибом оболочки; д — двухслойная

Таблица 4.17. Характеристики порошковых проволок

Марка проволоки	Диаметр, мм	Конструкция	Основные компоненты шихты	Положение шва в пространстве	Характер свариваемых изделий
ПП-АН1	2,8	Простая трубчатая с продольной щелью	Рутил + целлюлоза	Нижнее	Неответственные
ПП-АН3	3,0	То же	Мрамор + плавиковый шпат	»	Ответственные
ПП-ПН7	2,3	»	То же	Нижнее, вертикальное «снизу вверх», горизонтальное	То же
ПП-АН11	2,0... 2,4	»	»	Нижнее, вертикальное сверху вниз	»
ЭПС-15/2	2,5	Сложная трубчатая с продольной щелью	»	Горизонтальное, потолочное	»
ПП-2ДСК	2,3	То же	Плавиковый шпат	Нижнее	»

4.6. НАПЛАВОЧНЫЕ ЛЕНТЫ

Для наплавки используют стальную холоднокатаную, порошковую и металлокерамическую ленты. Применяемая для наплавки обрезная холоднокатаная лента в большинстве случаев имеет толщину 0,4... 1,0 мм при ширине 20... 100 мм. Лента поставляется в рулонах.

Аналогично порошковой проволоке для наплавки может применяться порошковая лента. В этом случае порошком заполняется по-

лость между двумя тонкими полосами, гофрируемыми в специальных валках для создания необходимой жесткости и завальцовываемых по продольным кромкам после заполнения порошком. Порошковую ленту некоторых марок используют при автоматической наплавке открытой дугой. Ленту поставляют в рулонах.

Металлокерамическую ленту изготавливают методом прокатки и спекания смеси порошкообразных материалов. Размеры ленты: толщина 0,8...1,2 мм, ширина 25...100 мм. Металлокерамическая лента обладает достаточной гибкостью и прочностью (минимальное временное сопротивление разрыву для ленты различных марок 40...60 МПа). Лента поставляется в рулонах. Металлокерамическую ленту большинства марок используют при автоматической дуговой наплавке под флюсом.

4.7. ПРИСАДОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ

При электрошлаковой сварке кроме обычных проволочных электродов применяют пластинчатые и пластино-проволочные электроды. Их конструкции индивидуальны, связаны с размерами свариваемого стыка. Примеры конструкций пластинчатых и пластино-проволочных электродов приведены на рис. 4.2.

Размеры пластинчатых электродов, применяемых при сварке только прямоугольных сечений, имеющих постоянное сечение шва по всей его высоте, должны быть обусловлены возможностями сварочного автомата и питающего оборудования.

В связи с тем что суммарное сечение n пластин (на рис. 4.2 $n = 3$) $\sum F_3 = nF_3 = n\delta B$ (F_3 — площадь сечения электрода; δ — толщина пластины; B — ширина пластины) меньше сечения заполняемого при сварке зазора a : $n\delta B < aS$ (S — толщина свариваемого элемента), а также вследствие того, что фактическое сечение шва больше заполняемого зазора, т. е. $F_{ш} = k a S$ (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, м/ч.

Пластино-проволочные электроды применяются, в частности, при необходимости выполнения шва с переменным сечением по его высоте. 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.

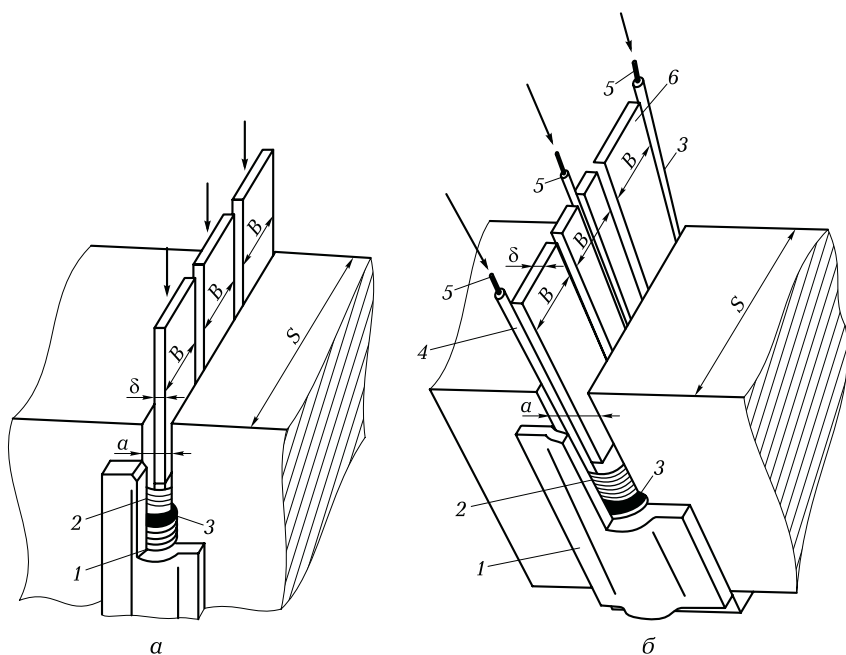


Рис. 4.2. Электрошлаковая сварка пластинчатыми (а) и пластино-проволочными (б) электродами:

1 — медные водоохлаждаемые пластины; 2 — шлаковая ванна; 3 — металлическая ванна; 4 — стальные трубки; 5 — электродные проволоки; 6 — пластина; B — ширина пластины; δ — толщина пластины; a — ширина зазора; S — толщина свариваемого элемента

4.8. ПРИСАДОЧНЫЕ КОЛЬЦА И ВСТАВКИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОРНЕВОГО СЛОЯ ШВА ПРИ СВАРКЕ ТРУБ

Для выполнения сварных соединений независимыми источниками теплоты (например, при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом, при электронно-лучевой сварке и др.) иногда технологически целесообразно введение присадочных материалов не извне, а как бы совместно с расплавляемым основным металлом. Например, при аргонодуговой сварке стыков труб, для получения почти гладкой обратной (внутренней, недоступной для подварки) стороны корневого шва, уже при сборке под сварку используют присадочные кольца. Некоторые решения по этому специфическому виду присадок приведены на рис. 4.3, а, б. Конкретные размеры таких присадочных колец и химический состав металла, из которо-

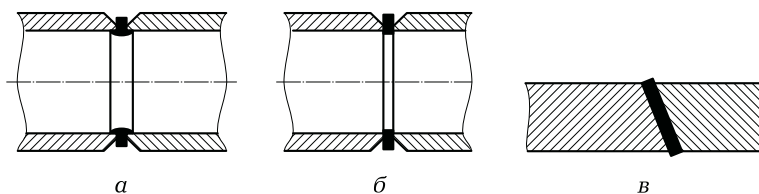


Рис. 4.3. Примеры присадочных колец (а, б) и вставок (в)

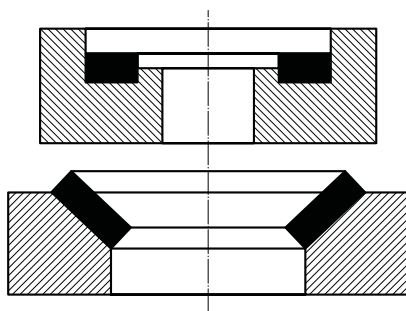


Рис. 4.4. Наплавочные вставки

го они изготавливаются, определяются конкретными условиями: толщиной и составом свариваемого металла.

Для регулирования состава металла при электронно-лучевой сварке разнородных металлов предложен способ введения в стык при сборе под сварку присадочных вставок. На рис. 4.3, в показан случай использования такой присадочной вставки при сварке стыков листов.

Аналогично решаются и отдельные задачи наплавки. Так, для некоторых поверхностей клапанов двигателей внутреннего сгорания и других изделий наплавочный сплав, предварительно изготовленный по соответствующей форме, укладывают на поверхность, подлежащую наплавке. Пример такого использования наплавочных вставок показан на рис. 4.4. Расплавляя дугой неплавящегося электрода в аргоне такую присадочную вставку на всю ее толщину и обеспечивая при этом (подбором режима) оплавление основного металла под вставкой, получают валик наплавки, состав которого зависит от составов присадки и основного металла и их долевого участия в получаемом валике.

При сварке плавлением композиционных материалов требуется расплавляемый элемент (присадочная вставка), а в некоторых случаях и присадочная проволока, материалом которых заполняются зазоры стыка. Расплавляемый элемент может быть прямоугольной, тавровой или двутавровой формы.

4.9.1. Общие сведения

Несмотря на широкое применение различных механизированных способов сварки плавлением, наибольшее количество сварных конструкций получают методом ручной дуговой сварки. Электрод для ручной дуговой сварки (рис. 4.5) представляет собой стержень 1 длиной до 450 мм, изготовленный из электродной проволоки, на поверхность которого нанесен слой покрытия 2. Левый конец электрода на участке длиной 20...30 мм освобожден от покрытия для зажатия его в электрододержателе с целью обеспечения электрического контакта. Торец другого конца не имеет покрытия для возможности возбуждения дуги посредством касания изделия электродом в начале процесса сварки.

Технологические характеристики электродов должны обеспечивать:

- возможность устойчивого горения дуги и плавления электрода на постоянном (при прямой или обратной полярности) либо переменном токе или обеспечение устойчивости горения дуги вне зависимости от рода тока;
- достаточную защиту расплавляемого металла электрода и сварочной ванны от накопления в них вредных примесей (кислорода, азота, серы). Достаточная изоляция от воздуха (от окисления и азотирования) осуществляется при этом комбинированной газовой и шлаковой защитой;
- возможность выполнения сварки при различном расположении швов в пространстве. Для этого кроме универсальных электродов, позволяющих выполнять нижние, вертикальные, горизонтальные и потолочные швы, применяют электроды и со специализированным назначением, например только для нижних швов, но создающие при этом некоторые преимущества (увеличение провара, производительности);
- возможность при использовании оптимальных режимов сварки получения хорошо сформированных валиков (швов) с достаточной мелкочешуйчатой наружной поверхностью и плавными переходами от шва к расплавляющимся кромкам основного металла;
- легкую удаляемость с поверхности швов шлака с помощью простейших инструментов (стальной щетки, остроконечного ручного легкого молотка);

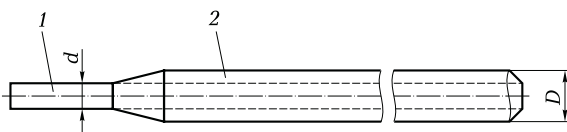


Рис. 4.5. Схема покрытого электрода для ручной дуговой сварки:

1 — стержень из электродной проволоки; 2 — покрытие; d — диаметр электродной проволоки; D — диаметр покрытого электрода

- исключение при сварке такого выделения газов и пылевидных частиц, которое превышает установленные нормы с точки зрения обеспечения санитарно-гигиенических условий для сварщика;
- наиболее высокую производительность 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.);
- достаточную стойкость покрытий против механических повреждений (осыпание, откалывание при относительно легких ударах, в процессе нагрева электрода при сварке и др.) и недопустимость (безвозвратного) ухудшения свойств при оговоренных условиях хранения.

К наплавленному металлу, как правило, предъявляются 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 сопоставима с плотностью прокатанного металла) и при этом обладать высокой сопротивляемостью к образованию горячих и холодных трещин в сварных соединениях.

Технологические свойства электродов, состав и качество наплавленного металла обеспечиваются составом электродных стержней, а также композицией электродных покрытий. При этом, как правило, основа химического состава наплавленного металла определяется составом стержня электрода, хотя его можно в случае необходимости существенно изменить в желеаемом 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.

Согласно ГОСТ 9466—75 «Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки сталей и наплавки. Классификация и общие технические условия» в соответствии с отношением D/d (см. рис. 4.5) различают электроды с тонким покрытием ($D/d \leq 1,2$) — М, средним ($1,2 < D/d \leq 1,45$) — С, толстым ($1,45 < D/d \leq 1,8$) — Д и особо толстым ($D/d > 1,8$) — Г.

Покрытие электрода представляет собой смесь веществ, нанесенную на него для усиления ионизации, защиты от неблагоприятного воздействия среды и металлургической обработки металла сварочной ванны. В покрытие электрода вводят ионизирующие, газо- и шлакообразующие, легирующие, раскисляющие, связующие и формовочные компоненты.

Ионизирующие, или стабилизирующие, компоненты, обеспечивающие устойчивое горение дуги, содержат элементы с низким потенциалом ионизации, такие как калий и кальций, которые входят в состав мела, полевого шпата и гранита, а также натрий.

Газообразующие компоненты применяют для создания газовой защиты зоны дуги и сварочной ванны. К ним относятся как органические вещества (крахмал, пищевая мука, декстрин и др.), так и неорганические (обычно карбонаты: мрамор CaCO_3 , магнезит MgCO_3 и др.). Газовая защита образуется в результате диссоциации органических веществ при температуре выше 200°C и карбонатов при температуре примерно 900°C . Процесс диссоциации происходит вблизи торца электрода. При обычном составе электродных покрытий на каждый грамм металла электродного стержня выделяется $90 \dots 120 \text{ см}^3$ защитного газа, состоящего из углекислого газа CO_2 , угарного газа CO , водорода H_2 и кислорода O_2 . При этом обеспечиваются достаточно надежное вытеснение воздуха из зоны сварки и попадание незначительного количества азота в металл шва (не более $0,03\%$).

Для получения жидких шлаков вводят шлакообразующие компоненты. К ним относятся следующие руды и минералы: ильменит, рутил, полевой шпат, кремнезем, гранит, мрамор, плавиковый шпат. Содержащиеся в покрытии ферросплавы связывают кислород, который отдают при нагревании шлакообразующие оксиды, входящие в покрытие. Жидкий шлак, покрывающий расплавленный металл электродных капель и сварочной ванны, химически взаимодействуя с ним, раскисляет его и связывает оксиды в легкоплавкие соединения. В то же время происходит легирование металла шва элементами, содержащимися в шлаке. Жидкий шлак, проницаемый для газов, выделяющихся в процессе химических реакций в жидком металле, способствует их удалению и формирует поверхность сварного шва.

Легирующие компоненты предназначены для улучшения механических характеристик металла шва, придания ему жаро- и изно-

стойкости, коррозионной стойкости и других свойств. Легирующими элементами служат хром, марганец, титан, ванадий, молибден, никель, вольфрам и т.д. Легирующие элементы вводят в покрытие в виде ферросплавов и чистых металлов.

Раскисляющие компоненты используют для восстановления (раскисления) части расплавленного металла, находящегося в виде оксидов. К ним относятся элементы, имеющие большее, чем железо (при сварке сталей), сродство к кислороду и другим элементам, оксиды которых требуется удалить из металла шва. Большинство раскислителей вводят в электродное покрытие в виде ферросплавов.

Связующие компоненты применяют для связывания порошковых составляющих покрытия в однородную вязкую массу, которая будет крепко удерживаться на стержне электрода при прессовке и образовывать прочное покрытие после сушки и прокалики. Чаще всего связующими компонентами служат водные растворы натриевого $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ или калиевого $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ жидкого стекла.

Формовочные компоненты — это вещества (бентонит, каолин, декстрин, слюда и др.), придающие обмазочной массе лучшие пластические свойства.

Различают «длинные» и «короткие» шлаки. Первые, у которых переход от жидкого состояния к твердому приходится на значительный температурный интервал, при прочих равных условиях хуже обеспечивают формирование шва. У расплавленных «коротких» шлаков возрастание вязкости с понижением температуры происходит быстро, и закристаллизовавшийся шлак препятствует стеканию жидкого металла при сварке в любом пространственном положении. «Короткие» шлаки образуются при использовании электродов с основным покрытием. Чем менее вязок шлак, тем больше его подвижность, а также физическая и химическая активность, тем быстрее протекают в нем химические реакции и физические процессы растворения оксидов, сульфидов. Кислые шлаки обычно бывают очень вязкими и «длинными», причем вязкость возрастает с повышением кислотности.

К химическим свойствам шлаков, существенно влияющим на сварочный процесс, относится их способность раскислять металл шва, связывать оксиды в легкоплавкие соединения и легировать металл шва.

Виды электродных покрытий установлены ГОСТ 9466—75. Различают электроды: А — с кислым покрытием, Б — с основным, Ц — с целлюлозным, Р — с рутиловым, П — прочего вида. При наличии покрытия смешанного вида используют соответствующее двойное обозначение. Если в покрытии содержится более 20 % железного порошка, то к обозначению вида покрытия добавляют букву «Ж».

У электродов с кислым покрытием (А) шлакообразующую основу составляют железные (гематит Fe_2O_3) и марганцевые MnO_2 руды,

а также кремнезем SiO_2 . Газовая защита расплавленного металла осуществляется органическими компонентами, сгорающими в процессе плавления электрода. В качестве раскислителя в покрытие вводят ферромарганец. Образующиеся кислые шлаки не содержат CaO и не очищают металл от серы и фосфора. В наплавленном металле много растворенного кислорода, водорода и неметаллических включений. В результате швы обладают невысокой стойкостью к образованию горячих трещин и пониженной ударной вязкостью. Electrodes с такими покрытиями непригодны для сварки сталей, легированных кремнием и другими элементами, так как они интенсивно окисляются. При сварке спокойных низкоуглеродистых сталей с высоким содержанием кремния возможно образование пор. При этом выделяется много токсичной пыли, содержащей оксиды марганца и кремния, и происходит довольно сильное разбрызгивание металла.

Достоинствами данных электродов являются стабильное горение дуги при постоянном и переменном токах, возможность сварки в различных пространственных положениях, большая скорость расплавления, высокая проплавливающая способность, отсутствие пор при наличии на свариваемых поверхностях окалины или ржавчины и при случайном удлинении дуги. Покрытиями этого вида обычно снабжают электроды марок МЭЗ-04 и СМ-5. Их применяют для сварки неответственных металлоконструкций.

У электродов с основным покрытием (Б) шлакообразующими компонентами являются карбонаты (мрамор, мел, магнезит) и фториды кальция (например, плавиковый шпат CaF_2). Газовая защита расплавленного металла обеспечивается углекислым газом и оксидом углерода, образующимися при диссоциации карбоната кальция в процессе нагрева и плавления покрытия. В качестве раскислителей покрытие может содержать ферромарганец, ферросилиций, ферротитан и ферроалюминий.

Сварочно-технологические свойства электродов с основным покрытием хуже, чем у электродов с покрытиями других видов. Образование большого количества отрицательных ионов фтора при плавлении покрытия приводит к уменьшению проводимости дугового разряда и снижению устойчивости горения дуги. Поэтому сварку электродами с основным покрытием осуществляют на постоянном токе обратной полярности. Для сварки переменным током необходимо применение электродов с дополнительным содержанием ионизирующих элементов в покрытии, например калия (в электродах марок СМ-11 и УП-1/55), или со специальным двухслойным покрытием (электроды марки АНО-Д и др.).

Наличие влаги, масла, окалины или ржавчины на свариваемых кромках, присутствие влаги в покрытии, а также увеличение длины дуги приводят к образованию пор в металле шва. Перед сваркой не-

обходима прокатка электродов при температурах 350... 400 °С в течение 1 ч. Для получения высококачественных швов следует строго соблюдать требования, касающиеся подготовки изделия, и выдерживать технологический режим процесса сварки. Электроды с основным покрытием, иногда называемым фтористо-кальциевым, предназначены для сварки ответственных конструкций из углеродистых, низколегированных и легированных сталей.

Электроды с целлюлозным покрытием (Ц) содержат много (до 50 %) органических составляющих (целлюлоза, травяная мука и т. п.) для образования большого количества газов. В качестве шлакообразующих компонентов чаще всего применяют рутил, карбонаты и алюмосиликаты, иногда добавляют асбест $\text{CaO} \cdot 3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2$, а для раскисления наплавленного металла — ферромарганец. При сварке на торце электрода образуется конусная втулка из нерасплавившегося покрытия, что способствует образованию направленного потока газов, который вытесняет жидкий металл из-под дуги и обеспечивает более глубокое проплавление основного металла. Такие электроды (марки ВСЦ-4А и др.) используют для сварки корневого слоя шва неповоротных стыков трубопроводов методом опирания сверху вниз с высокой скоростью, достигающей 25 м/ч. Они позволяют получить хорошую обратную сторону шва, что исключает необходимость его подварки изнутри. Для наложения заполняющих и облицовочных швов при сварке ответственных конструкций из низколегированных сталей во всех пространственных положениях предназначены, например, электроды марки ВСЦ-60.

У электродов с рутиловым (Р) покрытием шлакообразующую основу составляют рутиловый концентрат, содержащий до 45 % рутила TiO_2 ; алюмосиликаты — слюда $\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, полевой шпат $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$, каолин $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и др.; карбонаты — мрамор CaCO_3 и магнезит MgCO_3 . Газовая защита расплавленного металла обеспечивается введением органических соединений (до 5 %), а также разложением карбонатов. Наплавленный металл раскисляется и легируется ферромарганцем (до 10... 15 %). Поскольку у рутилового покрытия окислительная способность ниже, чем у кислого, количество марганца в нем меньше и его гигиенические характеристики гораздо лучше. Содержание оксидов марганца в аэрозоле при сварке в 3—5 раз меньше, чем при наличии кислого покрытия. По качеству наплавленного металла эти электроды занимают промежуточное положение между электродами с кислым и основным покрытиями.

Электроды с рутиловым покрытием обладают хорошими сварочно-технологическими свойствами: обеспечивают условия для формирования шва с плавным переходом к основному металлу, малое разбрызгивание расплава, легкую отделимость шлака, сварку во всех пространственных положениях, стабильное горение дуги

на постоянном и переменном токах. В металле шва практически не образуются поры при колебаниях длины дуги и сварке по окисленной или загрязненной поверхности. Наплавленный металл соответствует по химическому составу полуспокойной или спокойной стали. Покрытия этого вида имеют электроды марок АНО-4, ОЗС-12 и др.

К покрытиям электродов смешанного вида относят кислородно-целлюлозные (АЦ), рутилово-основные (РБ) — рутилово-карбонатные или карбонатно-рутиловые, кислородно-рутиловые (АР), рутилово-целлюлозные (РЦ) и другие виды покрытий. К электродам с кислородно-целлюлозным покрытием относят электроды марки ОМА-2, предназначенные для сварки тонколистовых конструкций (толщиной 1...3 мм) из углеродистых и низколегированных сталей постоянным и переменным током. К электродам с кислородно-рутиловым (ильменитовым) покрытием относят электроды марок ОММ-5, АНО-6, АНО-6М, АНО-17 и др. Они содержат в покрытии ильменит $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ и предназначены для сварки конструкций из углеродистых сталей во всех пространственных положениях постоянным и переменным током.

Электроды, предназначенные для ручной дуговой сварки, в стандартах классифицируются по следующим признакам: металлу, для сварки которого они предназначены; толщине и типу покрытия; механическим свойствам металла шва.

4.9.2. Электроды для сварки сталей

Согласно ГОСТ 9466 — 75 выпускается 116 типов электродов для сварки и наплавки сталей. В соответствии с назначением они разделены на следующие классы: для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей, имеющих временное сопротивление разрыву, или предел прочности, $\sigma_b < 600$ МПа, — У (условное обозначение); для сварки легированных конструкционных сталей с $\sigma_b > 600$ МПа — Л; для сварки теплоустойчивых сталей — Т; для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами — В; для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами — Н. Этот стандарт регламентирует размеры электродов, толщину и типы покрытий, условные обозначения, общие технические требования, правила приемки и методы испытания.

По допустимым пространственным положениям сварки или наплавки электроды подразделяют на четыре вида: для всех положений — индекс 1; для всех положений, кроме вертикального сверху вниз, — индекс 2; для нижнего, горизонтального на вертикальной плоскости и вертикального снизу вверх — индекс 3; для нижнего и нижнего «в лодочку» — индекс 4. По роду и полярности применяемого при сварке или наплавке тока, а также номинальному напря-

Таблица 4.18. Обозначение видов электродов в зависимости от рода и полярности сварочного тока

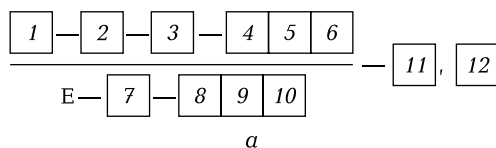
Рекомендуемая полярность постоянного тока	Напряжение холостого хода источника переменного тока, В		Обозначение вида электрода
	номинальное	пределы отклонений	
Обратная	50	± 5	0
Любая	50	± 5	1
Прямая			2
Обратная			3
Любая	70	± 10	4
Прямая			5
Обратная			6
Любая	90	± 5	7
Прямая			8
Обратная			9

жению холостого хода источника питания переменного тока частотой 50 Гц электроды подразделяются на виды, указанные в табл. 4.18.

Условное обозначение электродов должно содержать данные, расположение которых указано на рис. 4.6. Такое полное условное обозначение должно быть указано на этикетках или в маркировке коробок, пачек и ящиков с электродами.

Во всех видах документации приводится сокращенное условное обозначение электродов, которое содержит их марку, диаметр и группу, а также обозначения стандарта (ГОСТ 9466 — 75) или технических условий на электроды конкретной марки.

Например, для электродов типа Э46А (по ГОСТ 9467 — 75) марки УОНИ-13/45 диаметром 3 мм для сварки углеродистых и низколегированных сталей У с толстым покрытием Д 2-й группы, с установленной по ГОСТ 9467 — 75 группой индексов 4; 3; 2, указывающих характеристики наплавленного металла и металла шва, с основным покрытием Б для сварки во всех пространственных положениях 1 на постоянном токе обратной полярности 0 полное обозначение имеет вид, представленный на рис. 4.6, а сокращенное обозначение в технических документах — «Электроды УОНИ-13/45-3,0-2 ГОСТ 9466 — 75».



$$\frac{\text{Э46А—УОНИ-13/45—3,0—УД2}}{\text{Е—432 (5)—Б10}} \text{—ГОСТ 9466—75, ГОСТ 9467—75}$$

б

Рис. 4.6. Структура условного обозначения покрытых электродов для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей (а) и пример маркировки электрода типа Э64А (б):

1 — тип; 2 — марка; 3 — диаметр; 4 — назначение электродов; 5 — обозначение толщины покрытия; 6 — группа электродов; 7 — группа индексов, указывающая характеристики наплавленного металла и металла швов по ГОСТ 9466—75, ГОСТ 10052—75 или ГОСТ 10051—75; 8 — обозначение вида покрытия; 9 — обозначение допустимых пространственных положений сварки или наплавки; 10 — обозначение рода применяемого при сварке или наплавке тока, полярности постоянного тока и номинального напряжения холостого хода источника питания сварочной дуги переменного тока частотой 50 Гц; 11 — стандарт по классу стали в соответствии с ГОСТ 9466—75; 12 — стандарт на тип электрода

Для сварки теплоустойчивых сталей ГОСТ 9467—75 «Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей. Типы» предусматривает девять типов электродов. В основу классификации электродов положены химический состав наплавленного металла и его механические свойства: временное сопротивление разрыву, относительное удлинение и ударная вязкость.

Обозначения типов электродов состоят из индекса «Э» (электроды для дуговой сварки) и следующих за ним цифр и букв. Две первые цифры соответствуют среднему содержанию углерода в наплавленном металле в сотых долях процента. Среднее содержание основных химических элементов указано в процентах после буквенных обозначений химических элементов: А — азот, Б — ниобий, В — вольфрам, Г — марганец, К — кобальт, М — молибден, Н — никель, Р — бор, С — кремний, Т — титан, Ф — ванадий, Х — хром.

У электродов для сварки теплоустойчивых сталей вводится дополнительный индекс, указывающий максимальную температуру (°С), при которой нормированы показатели длительной прочности наплавленного металла и металла шва (0 — ниже 450 °С; 1 — 450... 465 °С; 2 — 470... 485 °С; 3 — 490... 505 °С; 4 — 510... 525 °С; 5 — 530... 545 °С; 6 — 550... 565 °С; 7 — 570... 585 °С; 8 — 590... 600 °С; 9 — свыше 600 °С).

В соответствии с ГОСТ 10052—75 «Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами. Типы» установлено 49 типов электродов для

сварки хромистых и хромоникелевых сталей, коррозионно-стойких, жаропрочных и жаростойких высоколегированных сталей мартенситно-ферритного, ферритного, аустенитно-ферритного и аустенитного классов. В основу классификации электродов положены химический состав и механические свойства наплавленного металла. Для некоторых типов электродов нормируются также содержание в структуре металла шва ферритной фазы, его стойкость против межкристаллитной коррозии и максимальная температура, при которой регламентированы показатели длительной прочности металла шва.

Две первые цифры в обозначении типов электродов, следующие за буквой «Э», указывают среднее содержание углерода в наплавленном металле в сотых долях процента. Цифры, следующие за буквенными обозначениями химических элементов, показывают среднее содержание элемента в процентах. Если содержание элемента в наплавленном металле менее 1,5 %, цифры не проставляют. При среднем содержании в наплавленном металле кремния до 0,8 % и марганца до 1,6 % буквы «С» и «Г» не ставят (например, Э-12Х11НВМФ). Приведенные показатели механических свойств характеризуют металл после сварки либо после термической обработки.

Если структура наплавленного металла не двухфазная, то индекс, характеризующий наплавленный металл, будет содержать только три знака: буква «Б» означает, что покрытие основное; цифра 3 — электрод пригоден для сварки в нижнем горизонтальном на вертикальной плоскости и в вертикальном снизу вверх положениях; 0 — электрод пригоден для сварки на постоянном токе обратной полярности.

В соответствии с ГОСТ 10051—75 «Электроды покрытые металлические для ручной дуговой наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами. Типы» регламентировано 43 типа электродов для наплавочных работ.

Для характеристики твердости наплавленного металла предусмотрены два цифровых индекса. Первая цифра характеризует твердость HRC: 0 — не менее 19; 1 — 19...27; 2 — 28...33; 3 — 34...38; 4 — 39...44; 5 — 45...50; 6 — 51...56; 7 — 57...60; 8 — 61...63; 9 — выше 63. Вторая цифра показывает условия получения регламентируемой твердости: 1 — непосредственно после наплавки; 2 — после термической обработки.

Наиболее распространенные марки покрытых электродов для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей с указанием типа электродов по ГОСТ 9467—75 приведены в табл. 4.19.

Наиболее распространенные марки покрытых электродов для ручной дуговой сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами с указанием типа электродов по ГОСТ 10052—75 приведены в табл. 4.20.

Таблица 4.19. Марки покрытых электродов для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей

Марки электродов	Тип электродов по ГОСТ 9467—75	Марки электродов	Тип электродов по ГОСТ 9467—75
АН1	Э38	ВИ10-16, У-340/105, ЦЛ-19	Э100
АНО-1, АНО-5, АНО-6, СМ-5	Э42	НИАТ-3М	Э125
ЦМ-9, АНО-4, ОЗС-12, МР-3	Э46	НИАТ-3	Э150
ВСН-3, ВСЦ-3	Э50	УОНИИ-13/45М	Э09М
УОНИ-13/45, СМ-11, ОЗС-2, УП-2/45	Э42А	УОНИИ-13/45МХ, ЦУ-2МХ, ЦЛ-14	Э-09МХ
ИТС-1 (УОНИИ-13/45)	Э46А	ЦУ-2ХМ, ЦЛ-38, Н3	Э-09Х1М
УОНИИ-13/55, АНО-9, УП-2/55, ЦУ-1	Э50А	Н10	Э-05Х2М
УОНИИ-13/55У	Э55	ЦЛ-55	Э-09Х2М1
УОНИИ-13/65	Э60	ЦЛ-20, Н6	Э-09Х1МФ
Н-1, АКЗ-70	Э70	ЦЛ-36	Э-10Х1М1НФБ
УОНИИ-13/85, ЦЛ-18	Э85	ЦЛ-26М	Э-10Х3М1БФ

Таблица 4.20. Марки покрытых электродов для ручной дуговой сварки высоколегированных сталей

Марки электродов	Тип электродов по ГОСТ 10052—75	Марки электродов	Тип электродов по ГОСТ 10052—75
УОНИ/10Х13	Э-12Х13	ЭА-606/10	Э-08Х19Н9ФГ2СМ
ЦЛ-41	Э-06Х13Н	ЦТ-1	Э-08Х16Н8Г3М3Ф
УОНИ/10Х17	Э-10Х17Т	КТИ-5	Э-09Х19Н11Г3М2Ф
КТИ-9	Э-12Х11НМФ	ЭА-400/10Т, ЦТ-7	Э-07Х19Н11М3Г2Ф

Окончание табл. 4.20

Марки электродов	Тип электродов по ГОСТ 10052—75	Марки электродов	Тип электродов по ГОСТ 10052—75
КТИ-10	Э-12Х11НВМФ	М22	Э-08Х24Н12Г3СТ
ЦЛ-32	Э-14Х11НВМФ	ЗиО-8, ЦЛ-25	Э-10Х25Н13Г2
УОНИ-13/ЭП-56	Э-10Х16Н4Б	ОЗЛ-5, ЦТ-17	Э-12Х24Н14С2
08Х25Н15ТМФ/48	Э-08Х24Н6ТАФМ	ЦЛ-9	Э-10Х25Н13Г2Б
ОЗЛ-14	Э-04Х20Н9	АНВ-24	Э-03Х15Н9АГ4
ОЗЛ-8, ОЗЛ-14-1	Э-07Х20Н9	ЭА-478/3, СЛ-16	Э-10Х20Н9Г6С
ОЗЛ-22	Э-02Х21Н10Г2	ОЗЛ-9, ОЗЛ-9А	Э-28Х24Н16Г6
ЦЛ-33	Э-06Х22Н9	АНВ-20	Э-02Х19Н15Г4М3В2
ЦТ-26	Э-08Х16Н8М2	АНВ-17	Э-02Х19Н18Г5АМ3
ЦТ-26-1	Э-08Х17Н8М2	ЭА-395/9, ЦТ-10, НИАТ-5	Э-11Х15Н25М6АГ2
ЦЛ-4, НИАТ-1, ЭНТУ-3М	Э-06Х19Н11Г2М2	ЭА-981/15	Э-09Х15Н25М6Г2Ф
ОЗЛ-20	Э-02Х20Н14Г2М2	КТИ-7	Э-27Х15Н35В3Г2Б2Т
АНВ-13	Э-02Х19Н9Б	ЭА-855/51	Э-04Х16Н35Г6М7Б
ЦТ-15, ЗиО-3	Э-08Х19Н10Г2Б	АНЖР-2	Э-06Х25Н40М7Г2
ЦЛ-111, ЦТ-15-1, ОЗЛ-7	Э-08Х20Н9Г2Б	ЦТ-36	Э-08Н60Г7М7Т
ОЗЛ-3, ОЗЛ-29	Э-10Х17Н13С4	АНЖР-1	Э-08Х25Н60М10Г2
ЭА-898/21Б	Э-08Х19Н10Г2МБ	ОЗЛ-21	Э-02Х20Н60М15В3
ЭА-400/13, ЭА-900/14, СЛ-28	Э-08Х19Н10Г2М2Б	ИМЕТ-10	Э-04Х10Н60М24
ЭА-606/11, ГЛ-2	Э-08Х19Н19Ф2С2	ЦТ-28	Э-08Х14Н65М15В4Г2

В ГОСТ 10051 — 75 приведено справочное приложение, в котором указаны наиболее распространенные марки электродов для наплавки и основные области их применения (табл. 4.21).

Таблица 4.21. Электроды для наплавки

Тип электродов	Марки электродов	Области применения	
Э-10Г2	ОЗН-250У	Наплавка деталей, работающих в условиях интенсивных ударных нагрузок (осей, валов, автосцепок, железнодорожных крестовин, рельсов и др.)	
Э-11Г3	ОЗН-300У		
Э-12Г4	ОЗН-350У		
Э-15Г5	ОЗН-400У		
Э-30Г2ХМ	НР-70		
Э-16Г2ХМ	ОЗШ-1	Наплавка штампов для горячей штамповки	
Э-35Г6	ЦН-4		
Э-30В8Х3	ЦШ-1		
Э-35Х12В3СФ	Ш-16		
Э-90Х4М4ВФ	ОЗИ-3		
Э-37Х9С2	ОЗШ-3	Наплавка штампов для холодной штамповки	
Э-70Х3СМТ	ЭН-60М		
Э-24Х12	ЦН-5		
Э-20Х13	48Ж-1		
Э-35Х12Г2С2	НЖ-3		
Э-100Х12М	ЭН-Х12М		
Э-120Х12Г2СФ	Ш-1		
Э-10М9Н8К8Х2СФ	ОЗШ-4		
Э-65Х11Н3	ОМГ-Н		Наплавка изношенных деталей из высокомарганцовистых сталей марок 110Г13 и 110Г13Л
Э-65Х25Г13Н3	ЦНИИН-4		
Э-80В18Х4Ф	ЦИ-1М	Наплавка металлорежущего инструмента, а также штампов для горячей штамповки в тяжелых условиях (осадка, вытяжка, прошивка)	

Тип электродов	Марки электродов	Области применения
Э-90В10Х5Ф2	ЦИ-2У	Наплавка металлорежущего инструмента, а также штампов для горячей штамповки в тяжелых условиях (осадка, вытяжка, прошивка)
Э-105В6Х5М3Ф3	И-1	
Э-10К15В7М5Х3СФ	ОЗИ-4	
Э-10К18В11М10Х3СФ	ОЗИ-5	
Э-95Х7Г5С	12АН/ЛИВТ	Наплавка деталей, работающих в условиях интенсивных ударных нагрузок с абразивным изнашиванием
Э-30Х5В2Г2СМ	ТКЗ-Н	
Э-80Х4С	13КН/ЛИВТ	Наплавка деталей, работающих в условиях преимущественно абразивного изнашивания
Э-320Х23С2ГТР	Т-620	
Э-320Х25С2ГР	Т-590	
Э-350Х26Г2Р2СТ	Х-5	
Э-300Х28Н4С4	ЦС-1	Наплавка деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания с ударными нагрузками
Э-225Х10Г10С	ЦН-11	
Э-110Х14В13Ф2	ВСН-6	
Э-17Б8Х6СТ	ЦН-16	
Э-08Х17Н18С6Г	ЦН-6М, ЦН-6Л	Наплавка уплотнительных поверхностей арматуры для котлов, трубопроводов и нефтеаппаратуры
Э-09Х16Н9С5Г2М2ФТ	ВПИ-1	
Э-09Х31Н8АМ2	УОНИ-13/ Н1-БК	
Э-13Х16Н8М5С5Г4Б	ЦН-12М, ЦН-12Л	
Э-15Х15Н10С5М3Г	ЦН-18	
Э-15Х28Н10С3ГТ	ЦН-19	
Э-15Х28Н10С3М2ГТ	ЦН-20	
Э-200Х29Н6Г2	ЦН-3	
Э-190К62Х29В5С2	ЦН-2	

4.9.3. Электроды для сварки меди

Электроды для ручной дуговой сварки меди изготавливают из тянутой проволоки или круглых тянутых и прессованных прутков в соответствии с ГОСТ 16130—90 «Проволока и прутки из меди и сплавов на медной основе сварочные». Указанный стандарт предусматривает три марки медной проволоки (М1, М1р и МСр1) и две марки прутков (М1р, М2р).

Для сварки меди применяются также электроды с использованием проволоки из бронз марок БрКМц3-1 и БрХ0,7 (ГОСТ 16130—90). По сортаменту сварочная проволока имеет диаметр от 0,8 до 8 мм, при этом для различных марок диапазон диаметров, предусмотренных стандартом, различен. Например, проволока марок М1, М1р и БрКМц3-1 изготавливается диаметром от 1,2 до 8 мм, а проволока марки МНЖ5-1 — только от 3 до 5 мм. Сортамент сварочных прутков еще более ограничен, они бывают только диаметром 6 и 8 мм.

Химический состав сварочной проволоки и прутков для дуговой сварки меди представлен в табл. 4.22.

В электродах марок ММ3-1 и ММ3-2 в качестве раскислителей применены ферросилиций, графит и сплав симанал состава: 31...35 % Si, 19...22 % Mn, 27...30 Al, до 0,12 % C, до 0,25 % S и до 0,5 % P. Применение сплава симанал (Si, Mn, Al) вместо ферросплавов позволило снизить содержание железа и вредных примесей в наплавленном металле, что улучшило технологичность электродов и коррозионную стойкость наплавленного металла.

Отличительной особенностью электродов марки АНЦ-1 является незначительное легирование металла, что существенно увеличивает его электропроводность.

Еще более низкую электропроводность имеет металл сварных швов, выполненных электродами с использованием проволоки из бронзы БрКМц3-1. Высокая электропроводность металла сварных швов достигается при использовании аргонодуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом с присадочными прутками из меди марки М1. В этом случае электропроводность сварных швов достигает 87...88 % от электропроводности основного металла марки М2.

Усовершенствованные и освоенные в серийном производстве электроды марок АНЦ/ОЗМ-2, АНЦ/ОЗМ-3 и АНЦ/ОЗМ-4 предназначены для сварки технически чистой меди, содержащей не более 0,01 % кислорода. Электроды имеют высокую производительность — от 4 до 4,9 кг/ч (для электродов диаметром 4 мм) и коэффициенты наплавки соответственно от 14,5 до 17,5 г/(А·ч), а также более высокую электропроводность наплавленного металла (от 50 до 60 % от электропроводности технически чистой меди). Это по-

Таблица 4.22. Химический состав сварочной проволоки и прутков для дуговой сварки меди

Марка проволоки и прутков	Сорт-мент	Массовая доля, %													
		основных компонентов					примесей								
		Cu	Si	Mn	Ag	Cr	Bi	Sb	As	Fe	Ni	Pb	Sn	Zn	O ₂
M1	Пр	99,9	—	—	—	—	0,001	0,002	0,002	0,005	0,002	0,005	0,002	0,004	0,055
M1p	Пр, Пт	99,9	—	—	—	—	0,001	0,002	0,002	0,005	0,002	0,005	0,002	0,005	0,01
M2p	Пт	99,7	—	—	—	—	0,002	0,005	0,01	0,05	0,2	0,01	0,05	—	0,01
MCp1	Пр	Ост.	—	—	0,8... 1,2	—	0,002	0,005	0,01	0,05	0,01S	0,01	0,05	—	0,07
БрХ0,7	Пр	»	—	—	—	0,4... 1,0	0,005 P	—	—	0,06	0,03 Si	0,05	0,002 Mg	0,007	—
БрКМц3-1	Пр	»	2,7... 3,5	1... 1,5	—	—	—	—	—	0,30	0,20	0,03	0,25	0,50	—

Примечание. Пр — проволока; Пт — пруток; Ост. — остальное.

зволяет применять их для сварки токопередающих деталей и узлов. К основному достоинству электродов серии АНЦ относится возможность сварки меди толщиной до 10 мм без разделки кромок и без предварительного подогрева, а при толщине от 10 до 25 мм — с пониженным предварительным подогревом до 200... 400 °С в зависимости от толщины и массы изделия.

Технические характеристики и области применения электродов для сварки меди приведены в табл. 4.23.

Таблица 4.23. Технические характеристики и области применения электродов для ручной дуговой сварки меди

Марка электрода	Марка стержня	Положение в пространстве	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Область применения и дополнительная информация
АНЦ-1	БрХ0,7	Нижнее	20... 24	Сварка изложниц кристаллизаторов и других толстостенных конструкций из меди М1-М3 многослойными швами. При толщине до 15 мм — сварка без подогрева; более 15 мм — подогрев до 250... 350 °С
АНЦ-2	М1	То же	20... 24	
АНЦ/ ОЗМ-2	М1	»	17,5	То же
АНЦ/ ОЗМ-3	М1, МТ	Нижнее и наклонное	16,5	Сварка и наплавка изделий из технической чистой меди, содержащей до 0,01 % кислорода, а также для сварки меди со сталью. При толщине меди до 10 мм — сварка без подогрева; более 10 мм — подогрев до 150... 350 °С (в зависимости от толщины и массы изделия). Перед сваркой обязательно прокатка электродов 350... 370 °С в течение 2 ч. Электропроводность металла шва не менее 60 % от электропроводности технической чистой меди

Марка электрода	Марка стержня	Положение в пространстве	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Область применения и дополнительная информация
АНЦ/ ОЗМ-4	М1, МТ	Нижнее и наклонное	14,5	То же. Возможна сварка и наплавка низколегированных сплавов на основе меди. Электропроводность металла шва не менее 50 % от электропроводности технической чистой меди
ЗТ	М1—М3	Нижнее	16,5	Сварка конструкций из раскисленной меди (М1р—М3р). Электроды имеют малую толщину покрытия, что снижает возможность зашлаковки при сварке многослойных швов
	БрКМЦ3-1	Нижнее и наклонное	16,5	
«Комсомолец»	М1	То же	13,5... 14,5	Сварка листовых конструкций и трубопроводов из меди М1—М3 и из бронзы Мц5. Электропроводность металла шва не менее 20 % от электропроводности технической чистой меди. Сварка с подогревом до 200...300 °С при толщине 5...8 мм; 500...600 °С при толщине 10...15 мм; 700...750 °С при толщине более 20 мм. Прокалка электродов перед сваркой при 160...200 °С в течение 1 ч
«Комсомолец-100»	М1—М3, МТ	»	13,5... 14,5	Сварка с подогревом до 200...300 °С при толщине 5...8 мм; 500...600 °С при толщине 10...15 мм; 700...750 °С при толщине более 20 мм. Прокалка электродов перед сваркой при 160...200 °С в течение 1 ч
«Комсомолец МН» и № 2	М2, М3	»	13,5... 14,5	Сварка меди с аустенитными хромоникелевыми сталями

Марка электрода	Марка стержня	Положение в пространстве	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Область применения и дополнительная информация	
«Комсомолец МС»	М2, М3	Нижнее и наклонное	13,5... 14,5	Сварка меди с углеродистыми и низколегированными сталями	
КОМ-1 и № 1	М2, М3	То же	—		
МЛ № 5	М1 — М3	Нижнее	12	Сварка меди с латунью марок Л63, ЛО62-1, ЛС59-1	
ММЗ-1	М1 — М3	Нижнее и наклонное		12	Сварка конструкций из раскисленной меди (М1р—М3р) с содержанием кислорода до 0,01 %. При толщине более 4 мм подогрев до 350... 400 °С
ММЗ-2	М1 — М3				
ЭМ-1	М1	—	—	Для сварки конструкций из меди толщиной более 20 мм	
№ 6	М1 — М3				

Примечание. Род тока — постоянный, полярность — обратная.

4.9.4. Электроды для сварки безоловянных бронз

Электроды для ручной дуговой сварки безоловянных бронз изготавливают из холоднодеформированной (тянутой) проволоки (ГОСТ 16130—90). Указанный стандарт предусматривает шесть марок сварочной проволоки: БрАМц9-2, БрАЖМц10-3-1,5, БрКМц3-1, БрХ0,7, БрХНТ и БрНЦр (табл. 4.24).

Электроды, изготовленные из катанных прутков диаметром 6 мм, более технологичны, чем литые, и обеспечивают получение более плотных швов и наплавки (без пор и шлаковых включений).

Таблица 4.24. Химический состав сварочной проволоки и прутков для дуговой сварки безоловянных бронз

Марка проволоки и прутков	Массовая доля, %								
	основных компонентов*								примесей, всего, не более
	Al	Mn	Fe	Si	Cr	Ni	Ti	Zr	
<i>Проволока</i>									
БрАМц9-2	8... 10	1,5... 2,5	—	—	—	—	—	—	1,5
БрАЖМц10-3-1,5	9... 11	1... 2	2... 4	—	—	—	—	—	0,7
БрКМц3-1	—	1... 1,5	—	2,7... 3,5	—	—	—	—	1,0
БрХ0,7	—	—	—	—	0,4... 1	—	—	—	0,3
БрХНТ	—	—	—	—	0,15... 0,35	0,5... 0,8	0,05... 0,15	—	0,2
БрНЦр	—	—	—	—	—	0,3... 0,6	—	0,04... 0,08	0,2
<i>Прутки</i>									
БрАЖМц9-2	8... 10	1,5... 2,5	—	—	—	—	—	—	1,5
БрАЖМц10-3-1,5	9... 11	1... 2	2... 4	—	—	—	—	—	0,7
БрАЖН10-4-4	9,5... 11	—	3,5... 5,5	—	—	3,5... 5,5	—	—	0,6
БрАЖ9-4	8... 10	—	2... 4	—	—	—	—	—	1,7
БрКМц3-1	—	1... 1,5	—	2,7... 3,5	—	—	—	—	1,0
БрКН1-3	—	0,1... 0,4	—	0,6... 1,1	—	2,4... 3,4	—	—	0,4

* Остальное — медь.

Таблица 4.25. Технологические характеристики и области применения электродов для ручной дуговой сварки безоловянных бронз

Марка электрода	Марки стержней	Положение в пространстве	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Область применения и дополнительная информация
АБ-2	БрАЖМц10-3-1,5, БрАЖ9-4, БрАМц9-2	Нижнее и наклонное	16,5... 17,0	Сварка конструкций, заготовок трубопроводов и фасонного литья из бронз БрАЖ9-4, БрАЖМц10-3-1,5, БрА10ЖЗМц2, БрАМц9-2 и др.
БЛ-1	БрАМц9-2	Нижнее	17,5... 18,0	Сварка и заварка дефектов отливок из бронз БрАМц9-2, Бр9Мц2Л
Бр1/ЛИИВТ	БрАМц9-2	Нижнее и наклонное	14,0	Сварка различных деталей, арматуры в морском судостроении, работающих при температурах до 250 °С
	БрА10	То же	14,0	Сварка деталей химического машиностроения и пружинящих деталей из бронз БрА7, БрА10
	БрКМц3-1*	»	14,0	Сварка трубопроводов сточных вод из бронзы БрКМц3-1, дымовых фильтров, антифрикционных деталей
Бр3/ЛИИВТ	БрАЖМц10-3-1,5	»	11,5... 14,0	Сварка деталей, работающих в среде пресной воды, жидкого топлива и пара воды при температурах до 250 °С из бронзы БрАЖМц10-3-1,5 и др.
	БрАМц9-2	»	11,5... 14,0	
ЗМИ/АН	БрАН14-3	»	—	Наплавка изношенных роторов низкого давления питателей установок непрерывной варки целлюлозы, работающих в условиях коррозионно-механического воздействия

ЗТ	БрАМц9-2	»	—	Заварка дефектов отливок из бронзы БрА9Мц2Л
	БрАЖ9-4	»	—	Заварка дефектов в массивных отливках из бронзы БрА9ЖЗЛ, в которой не наблюдается «самопроизвольный отжиг» при медленном остывании, а также для исправления дефектов в ответственных деталях (втулки, седла клапанов и др.) из бронзы БрАЖ9-4
	БрКМц3-1	»	16,5	Сварка конструкций в судостроении и химических аппаратов из бронзы БрКМц3-1
КАБ	БрАНМц8-5-1,5	Нижнее	16,5	Заварка дефектов в отливках из термически упрочняемой высокопрочной бронзы БрА9Н11Мц2
«Комсомолец 100»	М2, М3	Нижнее и наклонное	14,5	Сварка конструкций из бронзы БрМц5 (катализаторных решеток, диафрагм и др.) в оборудовании химической промышленности
ЛКЗ-АБ	БрАНМцЖ8-3-4-1	Нижнее	13,0... 16,5	Сварка конструкций и заварка дефектов в поковках и отливках из термически упрочняемых высокопрочных и коррозионно-стойких алюминий-никелевых бронз БрАНМцЖ8,5-4-4-1,5 (БрАНК), БрА8,5Н14Мц4Ж1,5
ЛКЗ-АБН	БрАМц9-2	Нижнее	15,5	То же, но применение стержней электродов из волооченой проволоки БрАМц9-2 позволяет изготавливать электроды диаметром 4... 5 мм, что необходимо для сварки корневых слоев без непроваров и зашлаковок

Марка электрода	Марки стержней	Положение в пространстве	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Область применения и дополнительная информация
ЛПИ-АБ-1	БрАМц9-2	Нижнее и наклонное	15...20	Сварка изделий из бронзы БрАМц9-2 и заварки дефектов в отливках из бронз БрА9Мц2Л, БрА10Мц2 и др.
	БрАЖМц10-3-1,5	То же	15...20	То же, из бронзы БрАЖМц10-3-1,5
	БрАЖМц8,5-4-5-1,5	»	15...20	То же, из бронзы БрАЖМц8,5-4-5-1,5
	БрАЖН10-4-4	»	15...20	То же, из бронзы БрАЖ10-4-4
Специальная	БрАМц9-2	Нижнее	19,0	Сварка изделий из бронзы БрАМц9-2 и наплавки уплотнительных поверхностей на стальные детали из углеродистых и низколегированных сталей
ЛПИ-73	БрАМц9-2	»	15,0	Сварка и ремонт деталей из бронз марок БрАЖМц9-4-4-1, БрАЖМц8,5-4-5-1,5 и аналогичных им. Электроды имеют высокие сварочно-технологические свойства. Рекомендуются для наплавки изношенных поверхностей гребных винтов и валов. Изготавливаются серийно прессовым способом диаметром 4 и 5 мм
	БрАЖНМц8,5-4-5-1,5	»	15,0	
ММЗ-2	БрАМц9-2	»	—	Сварка конструкций из бронзы БрАМц9-2 и заварки дефектов отливок из бронзы БрА9Мц2Л
	БрКМц3-1	Нижнее и наклонное	12,0	Сварка конструкций из бронзы БрКМц3-1

ЦБ1	БрАМц9-2	То же	16,0	Сварка конструкций из бронз БрАМц9-2, БрАМц10-2, БрАЖМц10-3-1,5 и др.
	БрАЖМц10-3-1,5	»	16,0	
ЭМ-1	БрКМц3-1	»	—	Сварка конструкций из бронзы БрКМц3-1
	БрХ0,7	»	—	Сварка деталей из бронзы Бр10-3-1,5
ЭМ-2, ЭМ-3	БрАЖМц10-3-1,5	»	—	Сварка и ремонт изделий из бронзы Бр10-3-1,5
	БрАМц9-2	»	—	Сварка и ремонт изделий из бронзы БрАМц9-2
ЛПИ-48-МАН-1	БрАМцЖН8-10-3-2	»	15... 17	Сварка судовых конструкций и заварка дефектов изделий из бронз БрАМцЖН18-10-3-2, БрА7Мц14ЖЗН2, «Суперстон 70»
ЛПИ-48-АН-2	БрАЖНМц8,5-4-5-1,5	»	18,0	То же, из бронзы БрАЖНМц8,5-4-5-1,5
ЛПИ-48-АН-5	БрАЖМц10-3-1,5	»	18,0	
ЛПИ-ЛКЗ-АН-4	БрАМц9-2	»	18,0	Сварка тонкостенных конструкций и корневых слоев при сварке больших толщин из высокопрочных, коррозионно-стойких, термически упрочняемых бронз БрАНМцЖ8,5-4-4-1,5, БрАЖНМц8,5-4-5-1,5 и др.
ЛПИ-ЛКЗ-АН	БрАЦКЖ8-6-0,3-0,3	Нижнее	18,0	Сварка конструкций и заварки дефектов деталей из бронзы с высокой демпфирующей способностью марки БрАЦКЖ8-6-0,3-0,3
ЛПИ-ЛКЗ-АН	БрАМц9 + спираль из Л63 или оболочка из ЛК62-0,5	»	13,0	
ЛПИ-13	БрАМц9-2	»	16,0	Сварка и заварка дефектов алюминиевой бронзы БрА9Мц2Л, сварка латуней, меди и ремонт мелких дефектов чугуновых деталей

Примечание. Род тока — постоянный, полярность — обратная.

* Полярность — прямая.

При дуговой сварке безоловянных бронз применяют электроды с различными составами покрытий, которые подразделяются на три группы:

- 1-я группа — покрытия, состоящие из галогенидов и криолита, хорошо растворяющие оксид алюминия (БЛ-1, КАБ, АБ-2);
- 2-я группа — покрытия, которые не содержат галогенидов и состоят из шлакообразующих материалов, а также являются сильными раскислителями и стабилизаторами дуги;
- 3-я группа — покрытия, содержащие как галогениды, так и раскисляющие, стабилизирующие и шлакообразующие материалы.

Лучшими сварочно-технологическими характеристиками обладают электроды, имеющие покрытия с галогенидами (1-й группы), которые не содержат ферросплавов и рудоминеральных материалов. Такие электроды применяются только при одинаковом или очень близком химическом составе стержней и основного металла.

Технологические характеристики и области применения электродов для сварки безоловянных бронз приведены в табл. 4.25.

4.9.5. Электроды для сварки оловянных бронз

Электроды для ручной дуговой сварки оловянных бронз изготавливают из тянутой сварочной проволоки (ГОСТ 16130—90) и литых прутков диаметром 6...8 мм. Указанный стандарт предусматривает всего две марки сварочной проволоки: БрОФ6,5-0,15 и БрОЦ4-3 (табл. 4.26). Кроме того, из оловянно-фосфористой бронзы марки БрОФ6,5-0,15 получают тянутые и холоднокатаные прутки по ГОСТ 10025—78 «Прутки оловянно-фосфористой бронзы. Технические условия», а из оловянно-цинковой бронзы — тянутые прутки по ГОСТ 6511—60 «Прутки оловянно-цинковой бронзы. Технические условия». Прутки по этим стандартам выпускаются диаметром 5...10 мм (через каждые 0,5 мм), а их химический состав регламентируется, так же, как и химический состав сварочной проволоки, по ГОСТ 5017—74.

Поскольку высокое содержание олова (более 10 %) оказывает отрицательное влияние на свариваемость оловянных бронз, стержни электродов изготавливают, как правило, из низкооловянных бронз марок БрОФ6,5-0,15, БрОФ6,5-0,4, БрОЦ4-3. При необходимости применения электродных стержней из бронз с высоким содержанием олова (БрО10Ф1 и др.) рекомендуется использовать партии (плавки) с ограниченным верхним пределом по содержанию олова (до 10 %). В электродные покрытия, наносимые на стержни из оло-

Таблица 4.26. Химический состав сварочной проволоки и прутков для ручной дуговой сварки оловянных бронз

Марка проволоки и прутков	Сортамент		Массовая доля основных компонентов*, %		
	Наименование	ГОСТ	Sn	P	Zn
БрОФ6,5-0,15	Проволока	5017—74	6...7	0,1... 0,25	—
	Прутки	10025—78			
БрОЦ4-3	Проволока	16130—90	3,5...4	—	2,7...3,3
	Прутки	6511—60**			

* Остальное — медь.

** С учетом изменений № 2 от 01.07.1984 и № 3 от 01.01.1991.

вянных бронз, нет необходимости вводить галогениды для растворения тугоплавких оксидов, так как при сварке такие оксиды образуются в очень малом количестве и только в бронзах, содержащих алюминий в пределах 0,4...0,8 % (БрОМцА8-0,7-0,7, БрОМА-2).

В сложившейся практике не разделяют составы покрытий, предназначенных для сварки безоловянных и оловянных бронз. Одни и те же марки электродных покрытий применяют для сварки как оловянных, так и безоловянных бронз. Однако такие решения не являются оптимальными, и для сварки оловянных бронз предпочтительнее использовать электроды с покрытиями, содержащими достаточное количество сильных раскислителей, без галогенидов.

Технологические характеристики и области применения электродов для сварки оловянных бронз приведены в табл. 4.27.

4.9.6. Электроды для сварки латуней

Электроды для ручной дуговой сварки латуней изготавливают из проволоки и пресованных прутков (ГОСТ 16130—90), а также литых прутков. Указанный стандарт предусматривает четыре марки сварочной проволоки: Л63, ЛО60-1, ЛК62-0,5 и ЛКБО62-0,2-0,04-0,5, а также три марки прутков: ЛМц58-2, ЛЖМц59-1-1 и ЛОК59-1-0,3 (табл. 4.28).

Латуни обладают высокой пластичностью, большое количество марок хорошо обрабатываются давлением как в горячем, так и в холодном состоянии. Поэтому необходимость применения литых прутков для изготовления латунных электродов весьма ограничена. Кроме того, на практике в ряде случаев сварка латунных кон-

Таблица 4.27. Технологические характеристики и области применения электродов для ручной дуговой сварки оловянных бронз

Марки электродов	Марки стержней	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Области применения и дополнительная информация
Бр1/ЛИИВТ, Бр1-У/ЛИИВТ	БрОМА-2	10 ... 15	Сварка облицовочных втулок гребных судовых валов из бронзы БрО10Ц2 и заварка дефектов отливок из бронз БрОМц8-0,7-0,7 и др.
	БрОМцА8-0,7-0,7	10 ... 15	
	БрОМцНФ6-0,7-1-0,2	10 ... 15	
	БрОФ6,5-0,15, БрОФ6,5-0,4	10 ... 15	Сварка деталей и заварка дефектов в отливках из бронз БрОФ6,5-0,15, БрОФ6,54, БрО10Ф1, БрОНФ9-2,5-0,2, БрО5Ц5С5
БрОФ10-1	10 ... 15		
Бр2П	БрОЦ4-3	27	Сварка деталей и заварка дефектов в деталях арматуры химической и бумажной промышленности из бронз БрОЦ4-3, БрОЦ8-4 и др.
ММЗ-2	БрОФ6,5-0,4	25	Заварка дефектов в деталях паровой и водяной арматуры из бронз БрО6Ц6С3, БрО5Ц5С5 и наплавки подшипников
	БрОЦ4-3	25	
ОЗБ-1	БрОФ6,5-0,4	23	Ремонт бронзовых деталей кузнечно-прессового оборудования, сухарей прокатных станов, втулок подшипников из бронз БрОФ6,5-0,4, БрО10Ф1 и др.
ОЗБ-2М	БрОФ6,5-0,4	23	Аналогичны электродам ОЗБ-1, но могут также применяться для заварки дефектов бронзовых скульптур, обеспечивая однородность цвета с бронзой для художественного литья. Прокатка электродов перед сваркой при 350 °С в течение 1 ч

ЗТ	БрОНМц6-0,6	7... 10	Сварка и заварка дефектов в отливках из бронз БрОЗЦ7С5Н1, БрО10Ц2, БрО6Ц6С2
	БрОФ4-0,4	7... 10	Сварка и заварка дефектов в деталях из оловянно-фосфористых бронз с повышенной прочностью и упругими свойствами (БрОФ4-0,25)
	БрОФ4-0,25	7... 10	
НГЗ1	БрОМцА8-0,7-0,7*	20... 25	Сварка и заварка дефектов отливок из бронзы БрОМцА8-0,7-0,7, а также двойных латуней ЛЦ40Мц1,5 и др.
ОБ-5	БрОНФ8-1,3-0,3	10... 15	Заварка дефектов отливок из бронзы БрОНФ8-1,3-0,3, а также из латуней ЛЦ38Мц2С2 и др.

Пр и м е ч а н и е. Полярность — обратная; положение в пространстве — нижнее и наклонное.

* Полярность — прямая.

Таблица 4.28. Химический состав стандартной сварочной проволоки и прутков для ручной дуговой сварки латуней

Марка проволоки и прутков	ГОСТ на химический состав	Массовая доля, %							
		основных компонентов*							примесей, всего, не более
		Cu	Si	Sn	Fe	Mn	Al	B	
<i>Проволока</i>									
Л63	15527 — 2004	62...65	—	—	—	—	—	—	0,5
ЛО60-1	15527 — 2004	59...61	—	1...1,5	—	—	—	—	1,0
ЛК62-0,5	16130—90	60...63,5	0,3...0,7	—	—	—	—	—	0,5
ЛКБО62-0,2-0,04-0,5	16130—90	60,5...63,5	0,1...0,3	0,3...0,7	—	—	—	0,03...0,10	0,5
<i>Прутки</i>									
ЛМц58-2	15527 — 2004	57...60	—	—	—	1...2	—	—	1,2
ЛЖМц59-1-1	15527 — 2004	57...60	—	0,3...0,7	0,6...1,2	0,5...0,8	0,1...0,4	—	0,2
ЛОК59-1-0,3	16130—90	58...60	0,2...0,4	0,7...1,1	—	—	—	—	0,3

* Остальное — цинк.

струкций производится (когда это допустимо по условиям эксплуатации конструкций) электродами для сварки бронз (БрКМц3-1 с покрытием ЗТ; БрАМц9-2 с покрытием Бр1/ЛИИВТ).

При сварке двойных латуней (Л63, Л68 и др.) не рекомендуется применять электроды со стержнями из латуни той же марки, что и основной металл, или двойной латуни другой марки, так как полученные при этом сварные соединения имеют низкие механические свойства. Поэтому электроды для сварки и двойных, и легированных латуней изготавливают, как правило, со стержнями из легированных латуней.

Для сварки двойных латуней Л60, Л63, Л68, Л70 можно использовать электроды, стержни которых изготовлены из проволоки и прутков на основе легированных латуней различных марок, но лучшие результаты дает применение электродов со стержнями из латуни АК80-3 (ЛЦ16К4) и ЛМцЖ55-3-1 (ЛЦ40МцЗЖ).

Области применения однослойных покрытий в сочетании со стержнями из латуней различных марок приведены в табл. 4.29.

При сварке конструкций больших габаритных размеров или толстолистовых изделий требуется общий или местный предварительный подогрев до 250...300 °С. Это обусловлено тем, что теплопроводность латуни в 3—3,5 раза больше, чем у стали, а с повышением температуры она увеличивается еще больше. Подогрев компенсирует теплоотвод и снижает возможность появления непроваров.

4.9.7. Электроды для сварки медно-никелевых сплавов

Высокая пластичность медно-никелевых сплавов обеспечивает возможность их легкой обработки давлением даже в холодном состоянии. Поэтому проволока является одним из основных сортов материалов выпускаемых промышленностью медно-никелевых сплавов. Это позволяет изготавливать стержни электродов для ручной дуговой сварки практически всех медно-никелевых сплавов из проволоки.

Для обеспечения идентичности химического состава и свойств металла шва и основного металла при дуговой сварке медно-никелевых сплавов покрытыми электродами используют, как правило, электроды со стержнями того же состава, что и основной металл (табл. 4.30).

Применяемые электродные покрытия содержат раскислители, а также материалы, создающие шлаковую и газовую защиту расплавленного металла. Поэтому широко используемые для сварки всех медных сплавов (бронз и латуней) электродные покрытия подходят также и для сварки медно-никелевых сплавов.

Таблица 4.29. Технологические характеристики и области применения электродов для ручной дуговой сварки латуней

Марка электрода	Марки стержней	Полярность	Положение в пространстве	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Области применения и дополнительная информация
АСЗ-6	ЛМцЖ55-3-1	Прямая	Нижнее	10	Сварка конструкций из латуней марок ЛМц58-2, ЛМц55-3-1 и заварка дефектов в гребных винтах
БЛ-1	ЛЖМц59-1-1, ЛМцЖ55-3-1	Обратная	Нижнее и наклонное	15	Заварка дефектов гребных винтов крупнотоннажных судов из латуни марки ЛМцЖ55-3-1
	БрАМц9-2	»	То же	15	То же, при сварке в жестком контуре без подогрева и исключения образования трещин
Бр1/ЛИИВТ	БрАМц9-2	»	»	10... 15	Заварка дефектов в отливках из латуни марки ЛМц58-2Л и сварка томпака Л90
ЗТ	БрКМц3-1	Прямая	Нижнее и наклонное до 70°	10	Сварка латуней марок ЛМц58-2, ЛЖМц59-1-1, Л63, Л90 и этих латуней с медью
	ЛЖМц59-1-1	»	То же	10	Сварка конструкций из латуни марки ЛЖМц59-1-1
	ЛК80-3 (при содержании Si до 3,5% и Pb до 0,1%)	»	»	10	Сварка деталей водопроводов и фасонных частей, работающих в среде воздуха, пресной воды и пара при температуре до 250 °С из латуней марок Л63, ЛК80-3, Л68, Л90 и др.

	ЛМц58-2	»	»	10	Сварка деталей и трубопроводов в химическом машиностроении и судостроении из латуни марки ЛМц58-2
	ЛМцЖ55-3-1	»	»	10	То же, из латуни марки ЛМцЖ55-3-1
ММЗ-2	ЛК80-3	»	»	10	Сварка деталей из кремнистых и свинцовых латуней марок ЛК80-3, ЛЦ16К4, ЛС63-3, ЛС64-2 и др., работающих на трение
НГЗ-1	БрОМцА8-0,7-0,7	»	Нижнее и наклонное	20...25	Сварка деталей из двойных латуней Л63, Л68 и заварки дефектов отливок из марганцевых латуней ЛМцС58-2-2
	ЛК80-3	»	То же	20...25	
	ЛМц58-2	»	»	20...25	
ОБ-5	БрОНФ8-1,3-0,3	Обратная	»	10...15	Заварка дефектов в отливках из латуни марки ЛМцС58-2-2
	ЛЖМц59-1-1	»	»	10...15	Сварка конструкций из латуни марки ЛЖМц59-1-1
	ЛК80-3 (при содержании Si до 3,5% и Pb до 0,1%)	»	»	10...15	Сварка конструкций и заварки дефектов в отливках из латуней марок Л63, Л68, ЛО62-1, ЛЦ16К4
	ЛМц58-2	»	»	10...15	Сварка конструкций из латуни марки ЛМц58-2
	ЛМцЖ55-3-1	»	»	10...15	Заварка дефектов в отливках из латуни марки ЛМцЖ55-3-1

Марка электрода	Марки стержней	Полярность	Положение в пространстве	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Области применения и дополнительная информация
№ 1П (КПИ)	ЛК80-3, ЛК62-0,5	Прямая	Нижнее и наклонное	14 ... 16	Сварка деталей из латуней марок Л63, ЛЦ16К4 и наплавки на сталь
№ 3	ЛО62-1	Обратная	То же	10 ... 15	Сварка деталей из латуни типа ЛО62-1 с низкоуглеродистыми сталями (Ст3 и др.)
№ 4	ЛО62-1	»	»	10 ... 15	Сварка деталей из латуни типа ЛО62-1 с аустенитными хромоникелевыми сталями (08Х18Н10Т и др.)
№ 5	ЛО62-1, ЛС59-1	»	»	10 ... 15	Сварка деталей из латуней марок Л63, ЛО62-1, ЛС59-1 с медью
№ 6	ЛК80-3	Прямая	»	20	Сварка листовых латуней Л63, Л68, ЛМц58-2 и заварки дефектов в отливках из латуни ЛК80-3
№ 7 (двух- слойное покрытие)	ЛК80-3	»	»	7 ... 10 (1-й слой), 10 ... 15 (2-й слой)	Заварка дефектов в отливках из латуней марок ЛК80-3, ЛМц58-2, ЛМцЖ55-3-1
	ЛМц58-2	»	»		
	ЛМцЖ55-3-1	»	»		

Таблица 4.30. Технологические характеристики и области применения электродов для ручной дуговой сварки медно-никелевых сплавов

Марка электрода	Марка стержня	Положение в пространстве	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Область применения и дополнительная информация
В-56У	НММцТА26-1,5-1,1-0,5	Нижнее и полувертикальное	11,5	Сварка деталей оборудования, работающего в агрессивных средах, в том числе в производстве плавиковой кислоты и фтористых солей, а также сварка сталей, плакированных монель-металлом НМЖМц28-2,5-1,5. Наплавленный металл имеет высокую коррозионную стойкость в средах, содержащих хлороводород и сероводород, при температурах до 200 °С. Прокалка электродов перед сваркой при 450...460 °С
М-30К	НМЖМц28-2,5-1,5	То же	13	
ЗТ	МНЖ5-1, МН5, МН10	»	18	Сварка труб из медно-никелевых сплавов МНЖ5-1, МН5, МН10 с толщиной стенок до 5 мм и приварка к ним фланцев из латуней Л90, Л85 и др., а также из бронзы БрАМц9-2
ЗМИ	МН48 (комбинированная тянутая проволока)	»	10,5	Наплавка деталей установок непрерывной варки целлюлозы, подвергающихся износу в среде варочного щелока
МН-4	МНЖ5-1, МНЖКТ5-1-0,2-0,2	»	—	Сварка конструкций и труб из сплава МНЖ5-1, а также других медно-никелевых сплавов при отсутствии требований идентичности химического состава шва с основным металлом

Марка электрода	Марка стержня	Положение в пространстве	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Область применения и дополнительная информация
МН19, МЕЖМц30-1-1	МН19, МНЖМц30-1-1	Нижнее и полув вертикальное	—	Сварка конденсаторных труб из мельхиора МНЖМц30-1-1, работающих при повышенных давлениях, температурах и скоростях пресной и морской воды
ЭНДХ-10	НМК4,5-11,5 (литые прутки)	То же	—	Сварка деталей из литого никель-кремнистого сплава, подвергаемых износу, и в средах, содержащих серную кислоту. Сварка с предварительным и сопутствующим подогревом при 650... 700 °С
ЛПИ МН-1	МНАЖМцТ6-2-1-3-0,3	Любое положение	15	Сварка и наплавка на бронзы медно-никелевого сплава марки МНАЖМцТ6-2-1-3-0,3
ЛПИ НМ-1	НМЖМц28-2,5-1,5	То же	12	Сварка монель-металла НМЖМц28-2,5-1,5 и наплавка монеля на алюминиевые и оловянные бронзы
УОНИ-13/45	НМЖМц28-2,5-1,5	»	8,5	Сварка ответственных конструкций из монель-металла. Сварку корневых слоев выполняют на стальной подкладке

Примечание. Полярность — обратная.

Для получения прочно-плотных швов без пор и трещин используют электроды со стержнями из проволоки МНЖКТ5-1-0,2-0,2 с покрытием марки МН4, которое содержит модификаторы и сильные раскислители — алюминий и титан, способствующие созданию мелкозернистой структуры и дегазации металла сварочной ванны.

Чтобы предотвратить пористость швов при сварке медно-никелевых сплавов с большим содержанием никеля (например, мельхиора МН19 и МНЖЗО-1-1), рекомендуется интенсифицировать газовыделение из сварочной ванны. Для этого в состав покрытия вводят большое количество мрамора и до 10 % графита, которые при диссоциации мрамора и раскислении ванны графитом образуют большое количество защитного газа (СО), интенсивно выделяющегося при сварке.

Для наплавки деталей установок непрерывной варки целлюлозы разработаны специальные марки электродов. Проволоку для стержней электродов изготавливают протяжкой через фильеру медной ленты и никелевой проволоки, а кремний вводится в наплавленный металл через покрытие в виде металлического порошка.

4.9.8. Электроды для сварки никеля

Широкое применение для ручной дуговой сварки никеля и плакированных никелем сталей получили электроды марки ОЗЛ-32. Эти электроды выпускаются серийно, что является их важным преимуществом по сравнению с остальными марками электродов. Рутило-карбонатный вид покрытия обеспечивает их высокие сварочно-техно-логические характеристики. Стержни электродов марки ОЗЛ-32 изготавливают из специального никелевого сплава НМцАТК, что определяет дефицитность и высокую стоимость этой проволоки и соответственно электродов.

Сварку ковкого никеля производят электродами марки 48-Нк-1. Стержни электродов изготавливают из специальной никелевой проволоки, легированной марганцем и магнием. К недостаткам этих электродов относятся нестабильность свойств сварных соединений, необходимость применения предварительного подогрева, а также проковки швов в процессе сварки и последующей термической обработки сварных соединений для снятия наклепа, созданного проковкой швов. В процессе проковки создаются сжимающие напряжения, которые препятствуют образованию трещин в околошовной зоне.

Технологические характеристики и области применения электродов для сварки никеля приведены в табл. 4.31.

Таблица 4.31. Технологические характеристики и области применения электродов для ручной дуговой сварки никеля

Марка электрода	Марки стержней	Положение в пространстве	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Области применения и дополнительная информация
Н-10	Н1	Нижнее	—	Сварка неответственных конструкций из никеля Н1. Склонны к пористости швов, для снижения которой рекомендуется подогрев до 250 ... 300 °С
Н-30К	Н1, НП1, НП2	Нижнее и вертикальное	9,5	Сварка ответственных конструкций из никеля и плакированных никелем сталей. При сварке многослойных швов большой толщины рекомендуется промежуточный отжиг до 150 ... 200 °С для повышения плотности наплавленного металла
Н-37К	Н1, НП1, НП2	То же	9,5	
48-Нк-1	Специальная проволока состава: Mn — 2,5 %; Mg — 0,013 %; Ni — основа	»	—	Сварка ковкого никеля. Необходим подогрев до 300 ... 350 °С, проковка швов с последующей термической обработкой (нагрев до 1 100 °С, охлаждение на воздухе в течение 1 ч)
«Прогресс-50»	Н1, НП1, НП2, НМц2,5	Любое	11,5	Сварка ответственных конструкций из никеля Н1, НП1 и НП2. Изготовление электродов возможно с применением проволоки НМц2,5 с соответствующим пересчетом состава покрытия. Полученные изделия отличаются хорошими технологическими свойствами
НП2	НП2	Нижнее	—	Сварка ответственных конструкций (корпуса реакторов) из никеля НП-2 и НП2 со сталью 12Х18Н10Т при выполнении требований по вакуумной плотности

УОНИ-13/45	Н1	»	—	Сварка неответственных конструкций. Склонность к пористости сварных швов. Рекомендуется подогрев до 150...200 °С
	НМц2,5	»	—	Использовались при сварке сосуда вместимостью 50 л, работающего в сильно агрессивной среде под давлением 1 МПа
ОЗЛ-32	НМцАТК1-1,5-2,5-0,15	Нижнее и вертикальное	12,0	Сварка никеля и биметалла, а также наплавка коррозионно-стойких слоев на углеродистую и коррозионно-стойкую сталь аппаратуры, работающей в щелочных и хлорсодержащих средах содового, мыловаренного производства и производства синтетических волокон. Прокалка перед сваркой при 190...210 °С в течение 1 ч

Примечание. Полярность — обратная.

Таблица 4.32. Химический состав проволоки сварочной из алюминия и алюминиевых сплавов, %

Марка проволоки	Массовая доля компонентов										Массовая доля прочих примесей	Сумма примесей
	Al	Mg	Mn	Fe	Be	Zr	Fe	Si	Zn	Cu		
СвА99	99,99	—	—	—	—	—	0,003	0,003	0,003	0,003	0,001	0,010
СвА97	99,97	—	—	—	—	—	0,015	0,015	—	0,005	0,01	0,03
СвА85Т	Ост.	—	—	—	—	—	0,04	0,04	0,02	0,01	—	0,08
СвА5	99,5	—	—	0,2... 0,35	—	—	—	—	—	0,015	0,05	0,50
СвАМц	Ост.	—	1...1,5	0,3... 0,5	—	—	—	—	0,10	0,20	0,10	1,35
СвАМг3	»	3,2... 3,8	0,3... 0,6	—	—	—	0,50	—	0,20	0,05	0,10	0,55
СвАМг4	»	4...4,8	0,5... 0,8	—	0,002... 0,005	—	0,40	0,40	0,20	0,05	0,10	1,15
СвАМг5	»	4,8... 5,8	0,5... 0,8	—	0,002... 0,005	—	0,40	0,40	0,20	0,05	0,10	1,40
Св1557	»	4,5... 5,5	0,2... 0,6	—	0,002... 0,005	0,2... 0,35	0,30	0,15	—	0,05	0,18	0,60
СвАМг6	»	5,8... 6,8	0,5... 0,8	—	0,002... 0,005	—	0,40	0,40	0,20	0,10	0,10	1,20

СВАМг63	»	5,8... 6,8	0,5... 0,8	—	0,002... 0,005	0,15... 0,35	0,05	0,05	0,05	0,05	0,001	0,15
СВАК5	»	—	—	—	—	—	0,60	—	0,10 Zn + + Sn	0,20	0,10	1,0
С0ВАК1	»	—	—	—	—	—	0,60	—	0,20	0,10	0,10	0,10
СВ1201	»	6... 6,8 Cu	0,2... 0,4	—	0,0001... 0,008	0,1... 0,25	0,15	0,08	0,05	—	0,02	0,001
СВАМг6	»	5,5... 6,5	0,8... 1,1	—	0,0001... 0,003	0,002... 0,12	0,40	0,40	0,20	0,05	—	0,10

Примечание. См. примеч. к табл. 1.18.

4.9.9. Электроды для сварки алюминиевых сплавов

При изготовлении электродов, предназначенных для ручной дуговой сварки алюминия технической чистоты, силумина и сплавов АМц, выбирают марку проволоки, состав которой наиболее близок к основному металлу. Электродные стержни изготавливают из тянутой и прессованной проволоки по ГОСТ 7871 — 75 (табл. 4.32), который регламентирует сортамент и химический состав 15 марок сварочной проволоки (четыре марки предназначены для сварки алюминия и 11 марок — для сварки алюминиевых сплавов).

Основу покрытий электродов для сварки алюминия и его сплавов составляют легкоплавкие хлористые и фтористые соли щелочных и щелочноземельных металлов (а также криолит). Они разделяются на безлитиевые и литиевые. Чистота материалов шихты покрытий оказывает большое влияние на качество электродов. Поэтому для изготовления электродных покрытий используют реактивные компоненты высшего сорта или химически чистые.

В состав ряда марок электродных покрытий входят только три компонента: KCl , $NaCl$ и Na_3AlF_6 (криолит). Соответственно электродные покрытия разделяются также на трехкомпонентные и многокомпонентные. Иногда криолит заменяют на $LiCl$, $MgCl_2$ и др.

Поверхность электродных стержней перед нанесением покрытий тщательно обезжиривается, оксидная пленка алюминия удаляется химическим травлением в растворе щелочи с последующим осветлением в азотной кислоте или химическим электрополированием, которое обеспечивает чистоту обработки поверхности на три класса выше, чем при химическом травлении. Для удаления кристаллизационной влаги и обеспечения равномерности состава покрытия сухую смесь компонентов шихты расплавляют при температурах 700...800 °С и после остывания расплав дробят, размалывают в шаровой мельнице и просеивают через сито, затем замешивают в растворе связующего компонента.

Основным назначением электродных покрытий при сварке алюминия и его сплавов являются разрушение и удаление оксидной пленки Al_2O_3 и защита расплавленного металла от повторного окисления. Оксидная пленка, образующаяся на поверхности алюминиевых сплавов, имеет более сложный состав, чем у алюминия. Например, при содержании в сплаве до 1,5 % магния оксидная пленка состоит из магниезиальной шпинели $Al_2O_3 \cdot MgO$, а при содержании магния более 1,5 % она представляет собой практически чистый магнезит, еще более тугоплавкий, чем оксид алюминия.

Технологические характеристики и области применения электродов для сварки алюминия и его сплавов приведены в табл. 4.33.

Таблица 4.33. Технологические характеристики и области применения электродов для ручной дуговой сварки алюминия и алюминиевых сплавов

Марки электродов	Марки стержней	Положение в пространстве	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Области применения и дополнительная информация
ОЗА-1	СвА5, АД1	Нижнее и ограниченно вертикальное	6,2...6,5	Сварка конструкций из алюминия технической чистоты марок АД, АД0, АД1 и др. Для толщин 6...8 мм подогрев до 200 °С; для толщин более 10 мм подогрев до 350 °С
ОЗАНА-1	СвА5	Нижнее и вертикальное	8,0	Сварка короткой дугой без поперечных колебаний электродов. Удаление шлака в процессе сварки стальными щетками, а после сварки тщательной промывкой горячей водой и протирка волосяными щетками. Прокалка электродов перед сваркой при 150...200 °С в течение 1 ч
ЭА-11Ф1	СвА5, АД1	Нижнее	—	
АФ-4аКр	СвА5	»	7,5...7,8	
ЭА-1 (ЭАЛ-1), № 18	СвА5, АД1, СвА97	Нижнее и ограниченно вертикальное	—	То же, для сварки изделий из алюминия высокой чистоты. Обеспечиваются лучшие результаты по плотности швов и коррозионной стойкости сварных соединений
МВТУ (№ 7Л)	СвАМц	Нижнее	—	Сварка конструкций из сплавов АМц и АМцС
48-АЭ-1	СвАМг5, СвАМг6, СвАМг61	»	—	Сварка конструкций из алюминиево-магниевого сплава (АМг1 — АМг6) и заварка дефектов в отливках из сплавов на основе Al—Mg (АЛ13, АЛ22, АЛ29 и др.). Сварка без подогрева
ВАМИ (№ 19)	СвА5, СвАМц, СвАМг3, СвАМг61	» » »	6...7	Сварка конструкций из технического алюминия, сплавов АМц, АМцС и алюминиевых сплавов АМг1 — АМг61

Марки электродов	Марки стержней	Положение в пространстве	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Области применения и дополнительная информация
A1, A1Ф (18Л), A2, № 21	СвАМц СвАК5	Нижнее	7,5... 7,8	Сварка конструкций из сплавов АМц, АМцС и заварка дефектов отливок из алюминиево-кремнистых сплавов (АЛ2, АЛ4, АЛ9, АЛ9-1, АК7 и др.)
МАТИ-1 (№ 20), С1 (№ 15Л)	СвАК5, АЛ4, АЛ5	»	—	Сварка и наплавка литых деталей, а также заварка дефектов отливок из алюминиево-кремнистых сплавов (АЛ2, АЛ4, АЛ9, АЛ9-1, АК7 и др.). Электроды марки МАТИ-2 рекомендуются для сварки изделий из технического алюминия
МАТИ-2 (№ 25)	СвАК5, АЛ4, АЛ5 СвА5	»	—	
ОЗА-2	СвАК5	Нижнее и ограниченно вертикальное	6,2... 6,5	
ВИАМ-2	СвАМц, СвАМг3— СвАМг61	Нижнее	—	Сварка конструкций из сплавов АМц, АМцС и алюминиевых сплавов АМг1 — АМг61
ВИАМ-3			—	
ВИАМ-11 (№ 11Л)			—	
ВИАМ-12 (№ 12Л)			—	

№ 1Л(1), № 2Л, № 16	СВАК5	»	6...7	Сварка конструкций и заварка дефектов отливок из не- легированного алюминия. Электроды марки № 16 при сварке чистого алюминия склонны к пористости
№ 10Л, № 13Л	СВАК5	»	—	Сварка конструкций из алюминиево-кремнистых спла- вов (АВ, АД31 и др.)
ОЗАНА-2	СВАК5	Нижнее и вертикальное	8,0	Заварка дефектов отливок и наплавка деталей из алюминиево-кремнистых сплавов типа АЛ-4, АЛ-9, АЛ-11. Сварка металла толщиной более 10 мм произ- водится с подогревом до 200 °С. Прокалка электродов перед сваркой при 150 °С в течение 0,5 ч

Примечание. Полярность — обратная.

4.9.10. Электроды для сварки магния и магниевых сплавов

Дуговая сварка магния и его сплавов покрытыми электродами в настоящее время применяется исключительно редко; это обусловлено большой трудоемкостью и трудностью удаления остатков флюсов и электродных покрытий, вызывающих быстрое коррозионное разрушение сварных соединений при недостаточно тщательном их устранении. Сварка магния покрытыми электродами применяется для неответственных конструкций.

Для изготовления электродов используют проволоку одинакового или близкого с основным металлом состава (табл. 4.34).

Таблица 4.34. Проволока для сварки магния и магниевых сплавов

Марки свариваемого основного металла	Марка сварочной проволоки
МА1	МА1
МА2, МА2-1, МА8	МА2-1
МА5	МА5
МА11	МА11
МА12	МА12
МА14 (ВМ65-1)	МА14
МА15 (ВМД3)	МА15
МА19 (ВМД6)	МА19
МА20 (ВМД-8)	МА20-1

Покрyтия электродов для сварки магния и его сплавов аналогично покрyтиям для сварки алюминия и алюминиевых сплавов состоят из фтористых и хлористых солей щелочноземельных металлов. Технология нанесения покрyтий та же, что и для сварки алюминия и его сплавов.

В качестве связующего материала используется насыщенный водный раствор хлорида натрия, поэтому покрyтия имеют низкую механическую прочность и требуют осторожного обращения при складировании и транспортировке во избежание осыпания покрyтий.

При длительном хранении, в течение нескольких суток, электроды просушивают при температурах 70... 100 °С непосредственно перед сваркой.

4.10. НЕПЛАВЯЩИЕСЯ ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Неплавящиеся электроды применяют при различных дуговых процессах. Материал неплавящегося электрода не должен участвовать в формировании состава наплавленного металла или металла шва. Основной задачей этих электродов является обеспечение устойчивого горения дуги при минимальном их расходе.

В сварочной технике наиболее распространены неплавящиеся электроды из углеродистых веществ и вольфрама. Электроды из углеродистых веществ подразделяют на угольные и графитовые. Уменьшение разогрева электродов достигается увеличением их сечения либо улучшением электропроводности.

Качественно 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 оставляет следа, а при легких ударах издает чистый звук, близкий к металлическому. Угольный электрод не должен растрескиваться при нагревании до высокой температуры. Угольные электроды с одного конца (рабочего, дугового) обтачивают на конус под углом $60 \dots 70^\circ$.

Графитовые электроды изготавливают из угольных посредством дополнительной высокотемпературной обработки — графитизации. Этот процесс заключается в выдержке угольных стержней при $2\,500 \dots 2\,600^\circ\text{C}$. Нагрев осуществляется пропусканием по стержням электрического тока достаточно большой силы. Графитовые электроды по химическому составу представляют собой почти чистый углерод. Они имеют серовато-черный цвет с металлическим отблеском, слегка пачкают бумагу, руки, значительно мягче, чем угольные.

Вольфрамовые электроды более удобны для большинства сварочных целей. Они могут иметь меньшие диаметры, обеспечивая необходимую электропроводность и большую механическую прочность, особенно при удобных малых сечениях (диаметрах).

Вольфрамовые стержни изготавливают из порошка. Металлический вольфрам высокой чистоты (99,7 %) получают и электролизом расплавов минералов с бурой при температурах $1\,050 \dots 1\,300^\circ\text{C}$. 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 изготавливать не только стержни меньшего диаметра, но и проволоку диаметром до $0,01$ мм.

Вольфрамовые электроды при сварке различных металлов используют как катод (при сварке на постоянном токе). В случае ис-

пользования их в качестве анода они очень быстро расходуются (плавятся), в связи с чем сварка неплавящимися вольфрамовыми электродами 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 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 в электроде составляющих с малой работой выхода электрода. Например, достаточно хорошие результаты дает диоксид тория ThO_2 , добавленный в количестве 1,5... 2% в порошок вольфрама перед его прессованием. Такие торированные электроды (марки ВТ-15) более стойки против оплавления торца (рис. 4.7) 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 соблюдения мер предосторожности. Работа с ними (хранение и сварка) производится с ограничениями, определяемыми санитарными правилами использования радиоактивных веществ.

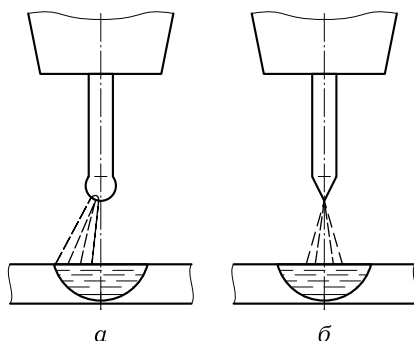


Рис. 4.7. Состояние концов электродов из чистого вольфрама (а) и из торированного вольфрама (б) при горении дуги в среде инертных газов

В последнее время разработаны лантанированные и иттрированные вольфрамовые электроды с 1,5...2,0 % LaO или Y₂O₃, обладающие улучшенными качествами.

Вольфрамовые электроды весьма чувствительны к окислению. Так, при наличии даже небольшого количества кислорода в газовой

Таблица 4.35. Рекомендуемые пределы силы сварочного тока при сварке вольфрамовыми электродами в инертных газах

Род тока	Защитный газ	Сварочный ток, А, при диаметре электрода, 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 прямой полярности	Ar	65... 150	140... 180	250... 340	300... 400	350... 450
	He	50... 110	100... 200	200... 300	250... 350	300... 400
Постоянный обратной полярности	Ar	10...30	20...40	30...50	40...80	60...100
	He	10...20	15...30	30...40	30...70	40...80

Таблица 4.36. Ориентировочные нормы расхода вольфрама при сварке

Свариваемые материалы	Толщина свариваемого металла, мм	Диаметр электрода, мм	Расход вольфрама, г на 100 м шва	
			Ручная сварка	Механизированная сварка
Алюминиевые и магниевые 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, коррозионно-стойкие и жаропрочные 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

фазе дуги на торце электрода образуется легкоплавкий оксид, приводящий к плавлению металла электрода, появлению капли жидкого расплава значительных размеров и блужданию дуги по такой капле. Рекомендуемые пределы режимов по току дуги приведены в табл. 4.35. Ориентировочный расход вольфрамовых электродов, определяемый потерями на испарение (частично и на плавление), представлен в табл. 4.36.

4.11. МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ МАШИН ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

При некоторых видах контактной сварки, в первую очередь точечной, недостаточная стойкость электродов приводит к заметным потерям времени в связи с необходимостью их частой заправки и замены. 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 увеличена и превысит 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 (первую) условно можно характеризовать как работающую при малой плотности тока.

Во вторую группу входят электроды, эксплуатируемые при высокой плотности тока, практически 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 можно считать одинаковыми. Сопоставимы и их контактные сопротивления. Для расплавления в контакте деталь—деталь при ограничении разогрева электрода вблизи его контакта с деталью необходим интенсивный отвод теплоты в электрод. В этом случае тепловыделение в свариваемых деталях из металла с заметно меньшей электропроводностью будет значительно больше, чем в приконтактных зонах электрода.

Третья группа включает в себя 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.

Можно сформулировать следующие требования к материалам электродов для контактных машин по электропроводности (удельному электрическому сопротивлению) и твердости:

- для первой группы: твердость в условиях эксплуатации составляет 180... 225 НВ; удельное сопротивление не более чем в 2— 2,5 раза превышает удельное сопротивления меди;
- для второй группы: твердость НВ ≥ 90 и сопоставима с твердостью свариваемого металла (например, низкоуглеродистой стали); удельное сопротивление меньше чем 1,4 удельного сопротивления меди;
- для третьей группы: удельное сопротивление меньше удельного сопротивления меди, однако возможно использование и других материалов, в частности с высокой температурой плавления (вольфрама или молибдена), применяемых в виде вставок в медные наконечники.

В ряде случаев для изготовления электродов точечных и роликовых машин применяется холоднотянутая технически чистая медь (табл. 4.37). При интенсивном процессе сварки приконтактные области электрода нагреваются, падает твердость, происходит смятие

Таблица 4.37. Сравнительные свойства некоторых материалов для электродов контактных машин

Материал	Массовая доля, %					Относительная электропроводность, % к электропроводности меди	НВ	Температура рекристаллизации, °С
	Cu	W	Cd	Cr	Zr			
Медь М-1 отожженная	99,9	—	—	—	—	100	40	—
Медь М-1 твердотянутая	99,9	—	—	—	—	98	80...90	200
Кадмиевая бронза	Ост.	—	1...1,2	—	—	80...90	100...120	250
Сплав ЭВ	»	—	—	0,4...0,8	0,3...0,6	75...80	120...140	400
Бронза БрХ	»	—	—	0,4...1	—	80...85	120...140	420
Кирит А	40...45	60...55	—	—	—	45	225	—

Примечание. См. примеч. к табл. 1.18, примеч. 2 к табл. 2.3.

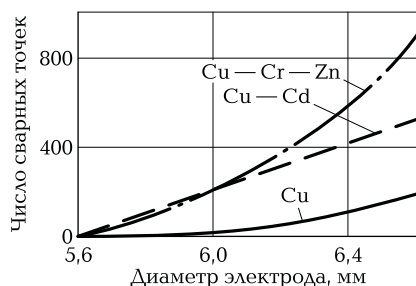


Рис. 4.8. Изменение диаметра электрода точечной машины в зависимости от материала электрода и числа сварных точек

контактной поверхности электрода (рис. 4.8), что приводит к необходимости заточки.

Повышение твердости и температуры рекристаллизации возможно легированием меди. Однако легирование меди почти всеми элементами значительно снижает электропроводность (и соответственно теплопроводность).

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.

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.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для чего при сварке необходима присадочная проволока?
2. По каким признакам классифицируется стальная сварочная проволока?
3. Какие требования предъявляются к стальной наплавочной проволоке?
4. Каковы основные характеристики чугуновых прутков для сварки и наплавки?
5. Назовите основные марки и охарактеризуйте порошки для наплавки.
6. Из каких элементов состоит конструкция порошковой проволоки? Назовите ее основные марки.
7. Для каких целей предназначены наплавочные ленты?
8. Какие виды присадочных материалов применяются при электрошлаковой сварке?

9. Для чего используют присадочные кольца и вставки?
10. Перечислите основные типы плавящихся электродов для сварки сталей.
11. Какие плавящиеся электроды применяют для сварки меди и ее сплавов?
12. Назовите основные типы электродов для сварки алюминиевых сплавов.
13. Перечислите основные виды неплавящихся электродов для сварки и назовите области их применения.
14. Каковы основные требования к материалам электродов для машин контактной сварки?

НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

5.1. 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, ухудшая свой состав и свойства. Так, например, при сварке 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 — капля 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 и твердого, нагретого ниже температуры плавления.

В связи с этим следует предохранять при сварке от воздействия воздуха либо только расплавленный металл, либо и расплавленный, и твердый, нагретый до достаточно высоких температур. Идеальным решением проблемы 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. Достичь их полного удаления, как правило, при сварке не удается.

Однако воздействие на металл окружающей среды можно свести к минимуму, к пределу, который практически будет незаметен. Таковую материальную среду в реакционном сварочном пространстве можно считать пассивной, инертной. Среда, осуществляющая необходимую защиту металла при сварке от воздействия воздуха, является газовой или жидкостной.

Защита от кислорода и азота воздуха может быть осуществлена путем почти полного удаления последнего (до состояния высокого вакуума, например, при электронно-лучевой сварке) либо путем от-

теснения воздуха от реакционного сварочного пространства другими газами. Это обычно достигается направлением в зону сварки так называемых защитных газов.

Если сварка выполняется в естественных условиях, т. е. в окружении воздуха, его оттеснение осуществляется мощной направленной струей защитного газа. Эта струйная защита, кроме требований к самому защитному газу, должна отвечать и некоторым общим требованиям, таким как отсутствие замешивания внешней газовой среды в струю, достаточное оттеснение окружающего газа.

Если химическая активность и возможность реагирования защитного газа с расплавленным металлом зависят от состава защитного газа, то надежность струйной защиты определяется рядом других параметров (сечение струи, начальная скорость истечения газа, его плотность и др.).

Струйная защита применяется при сварке с использованием инертных газов, а также активных газов, явно реагирующих с металлом. Струйная защита 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 удаляется воздух до создания вакуума, а затем этот объем заполняется газом или газовыми смесями такого состава, который удовлетворяет требованиям получения металла в сварных соединениях необходимого состава и свойств. В этом случае сварка осуществляется сварочной дугой неплавящимся или плавящимся электродом.

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 защитным газом является очищенный азот, а для молибдена — водород. Возможны и другие комбинации газов и их смесей.

При сварке ряда металлов применение таких газов не обязательно, а иногда (например, для кипящих низкоуглеродистых сталей) может даже создавать трудности в получении швов необходимого качества. Использование в этих случаях 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. Обычным методом использования таких газов является струйная защита.

Таким образом, в сварочной технике применяется много защитных газов и их смесей. Однако наибольшее предпочтение в сварочном производстве отдается различным шлакам.

При газопламенной обработке металлов — сварке, пайке, кислородной резке, газопламенной местной термической обработке, металлзации и напылении — источником необходимого нагрева служит 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 используется как составляющая горючей смеси, а также в чистом виде при кислородной (пламенной и дуговой) резке и в виде добавок к различным защитным газам при дуговой сварке. Особенно активно он применяется для кислородной резки металлов, в меньшей степени — для газовой сварки и других методов обработки и сварки.

Основные физические константы кислорода:

Молекулярная масса	32
Масса 1 м ³ при 0 °С и 0,1 МПа, кг.....	1,43
Критическая температура, К.....	154
Температура сжижения при 0,1 МПа, К	90,18
Масса 1 м ³ жидкого кислорода при -183 °С и 0,1 МПа, кг	1 140
Количество газообразного кислорода, получающегося из 1 м ³ жидкого кислорода при 0 °С и 0,1 МПа, м ³	860

Кислород обладает высокой химической активностью и способен образовывать химические соединения (оксиды) со всеми элементами, кроме инертных газов и благородных металлов. Скорость реакции окисления возрастает при повышении температуры или использовании катализаторов. Реакции окисления органических веществ в кислороде происходят с выделением большого количества тепловой энергии. Повышение давления и температуры кислорода в зоне реакции значительно ускоряет ее протекание. В сжатом или нагретом кислороде процесс окисления может осуществляться с нарастающей скоростью за счет теплоты, выделяющейся в зоне реакции, и соответствующего повышения температуры.

Кислород получают электролизом воды и разделением воздуха методом глубокого охлаждения. Химические способы малопроизводительны и неэкономичны.

Основным способом промышленного получения кислорода во всем мире является извлечение его из атмосферного воздуха мето-

дом глубокого охлаждения и ректификации воздуха. Атмосферный воздух представляет собой смесь газов с разными температурами сжижения (основные части — азот и кислород). В установках для получения кислорода и азота из воздуха последний подвергается очистке от примесей, сжатию в компрессоре до соответствующего давления холодильного цикла (0,6... 20 МПа), охлаждению в теплообменниках до температуры сжижения и затем в жидком виде разделению (низкотемпературной ректификации) на кислород и азот. Ректификацией называется процесс многократного испарения и конденсации жидкости на тарелках разделительного аппарата, так называемой ректификационной колонны, при этом в верхней части колонны собираются пары, состоящие из чистого легкокипящего компонента (азота), а внизу колонны — жидкость, содержащая в основном менее летучий компонент (кислород).

В сварочном производстве применяются разнообразные горючие газы, наиболее универсальным из которых является ацетилен. Остальные горючие газы рассматриваются как его заменители, хотя в ряде случаев (например, при кислородной резке) их использование предпочтительнее не только по экономическим, но и по техническим причинам.

Ацетилен представляет собой углеводород ненасыщенного ряда. Его химическая формула C_2H_2 , структурная формула $H-C \equiv C-H$. При атмосферном давлении и нормальной температуре ацетилен — бесцветный газ. Технический ацетилен из-за примесей имеет резкий специфический запах. При $20\text{ }^\circ\text{C}$ и 0,1 МПа плотность ацетилена составляет $1,09\text{ кг/м}^3$.

Важным параметром сварочного пламени помимо его температуры является также интенсивность горения — произведение нормальной скорости горения на теплоту сгорания смеси. Данные об интенсивности горения ацетилена и некоторых других горючих приведены в табл. 5.1. Ацетилен обладает наибольшей интенсивностью горения по сравнению с другими газами, используемыми при газопламенной обработке.

Основной способ получения ацетилена — переработка карбида кальция. Этот способ довольно дорог и требует затраты большого количества электроэнергии. За последние годы разработаны и быстро внедряются в промышленность более экономичные и высокопроизводительные методы получения ацетилена: из природного газа пиролизом метана в смеси с кислородом и разложением жидких горючих веществ (нефти, керосина) под действием дугового разряда. Получение ацетилена из природного газа на 30... 40 % дешевле, чем из карбида кальция. Пиролизный ацетилен по свойствам не отличается от ацетилена, получаемого из карбида кальция.

Для хранения и транспортировки ацетилена под давлением используют баллоны, заполненные специальной пористой массой,

Таблица 5.1. Интенсивность горения газов

Горючий газ	Полное сгорание		Нормальное пламя			
			Горючее, %	Интенсивность горения, МДж/(м ² ·с)		
	Горючее, %	Интенсивность горения, МДж/(м ² ·с)		первичная	вторичная	общая
Ацетилен	28,1	116	49	52	92	175
Водород	66,7	75	80	44	42	86
Метан	33,3	58	40	47	23	71
Пропан	16,7	55	20	51	113	62

пропитанной ацетоном. Ацетон, являясь хорошим растворителем ацетилена, позволяет существенно увеличить его количество, накапливаемое в баллон. Кроме того, ацетон снижает взрывоопасность ацетилена. Ацетон удерживается в порах массы и распределяется по всему объему баллона, что увеличивает поверхность его контакта с ацетиленом при растворении и выделении из раствора. Ацетилен, отпускаемый потребителям в баллонах, называется растворенным.

Газы — заменители ацетилена целесообразно использовать в тех процессах газопламенной обработки, где не требуется слишком высокая температура подогревающего пламени. К таким процессам относятся сварка легкоплавких металлов (алюминия, магния и их сплавов, свинца), пайка высокотемпературными и низкотемпературными припоями, поверхностная закалка, сварка тонкой стали, кислородная разделительная и поверхностная резка. Особенно широкое применение газы-заменители находят при кислородной разделительной резке, где температура подогревающего пламени влияет лишь на длительность начального подогрева металла перед резкой. Поэтому в этом случае могут использоваться все газы-заменители, у которых температура пламени при сгорании в смеси с кислородом не ниже 2 000 °С, а теплота сгорания не менее 10 МДж/м³.

Коэффициент замены ацетилена — это отношение расхода газа-заменителя $V_з$ к расходу ацетилена $V_а$, при равном тепловом воздействии на нагреваемый металл; обозначается как $\psi = V_з/V_а$. Для определения значения коэффициента замены используют графики, по которым находят расход газа-заменителя для условий, когда он при сгорании в смеси с кислородом, при рабочем соотношении газов в смеси, дает эффективную мощность пламени, равную таковой для ацетиленокислородного пламени при соотношении кислорода к ацетилену, равном 1,15. Принимаемые на практике значения

Таблица 5.2. Значения коэффициентов замены ацетиленом другими горючими газами

Резка стали	Водорода	Природный газ	Пропан технический	Коксовый газ	Нефтяной газ	Сланцевый газ
Разделительная	5,2	1,6... 1,8	0,6	3,2... 4,0	1,2	4,0
Поверхностная	—	4,0	1,0... 1,2	5,0	1,8... 2,4	6,0... 8,0

коэффициентов замены ψ ацетиленом другими горючими газами приведены в табл. 5.2.

Водород технический поставляется по ГОСТ 3022—80 «Водород технический. Технические условия». В зависимости от способа получения выпускается водород следующих марок: А — получаемый электролизом воды; Б — получаемый железопаровым способом и взаимодействием ферросилиция с раствором щелочи; В — получаемый электролизом хлористых солей; Г — получаемый паровой конверсией углеводородных газов. Объемная доля чистого водорода в техническом водороде колеблется в пределах 95...99,8%. Отпускается в стальных баллонах под давлением до 16,5 МПа.

В нормальных условиях водород представляет собой газ без цвета и запаха плотностью 0,084 кг/м³. Водород способен проникать через мельчайшие неплотности в окружающую среду, образуя взрывоопасные смеси с воздухом. Пределы взрываемости водорода, об. %: с воздухом — 4...75, с кислородом — 4...94. Поэтому при работе с водородом необходимо обращать особое внимание на герметичность аппаратуры и газовых коммуникаций.

Природный газ состоит в основном из метана. Состав природного газа определяется характером газового месторождения и примерно характеризуется следующими данными: 97,8% CH₄; 0,9% C₂H₆ и C₃H₈; 1,3% N₂ и CO₂. Плотность природного газа может быть принята равной 0,7...0,9 кг/м³, низшая теплота сгорания в зависимости от состава 31...33 МДж/м³. Температура пламени при сгорании в смеси с кислородом равна 2 100...2 200 °С; при дополнительном подогреве смеси в мундштуке горелки температуру пламени можно повысить до 2 300 °С. Пределы взрываемости в смеси, об. %: с воздухом — 4,8...16,7, в смеси с кислородом — 5,0...59,2. При газопламенной обработке газ к постам подается в баллонах под давлением до 16,5 МПа или по трубопроводу под низким давлением примерно 0,3 МПа.

Природный газ используют при разделительной и поверхностной кислородной резке стали, сварке стали толщиной до 4...5 мм, сварке легкоплавких металлов и сплавов, пайке и других процессах газопламенной обработки, допускающих использование пламени с более низкой температурой, чем кислородно-ацетиленовое.

Пропан технический и пропанобутановая смесь являются побочными продуктами переработки нефти. Пропан технический состоит главным образом из пропана C_3H_8 или из смеси пропана и пропилена C_3H_6 , количество которых в сумме должно быть не менее 93 об. %. Кроме того, в нем содержится не более 4 % этана C_2H_6 и этилена C_2H_4 (в сумме) и не более 3 % бутана C_4H_{10} и бутилена C_4H_8 .

Плотность пропана составляет 1,88 кг/м³, бутана — 2,52 кг/м³. Плотность относительно воздуха для пропана 1,57, для бутана 2,1.

Низшая теплота сгорания пропана равна 87 МДж/м³, бутана — 116 МДж/м³. Пределы взрываемости в смеси с воздухом: 2,0...9,5 % пропана, 1,5...8,5 % бутана; пределы взрываемости в смеси с кислородом: 2,4...57 % пропана, 3,0...45 % бутана.

Температура пламени пропана и пропанобутановой смеси при сгорании в смеси с кислородом равна 2300...2350 °С и при дополнительном подогреве смеси в мундштуке может достигать 2700 °С.

Сжиженные газы широко применяют в качестве заменителей ацетилена, так как они дают достаточно высокую температуру газокислородного пламени, относительно дешевы, недефицитны, удобны для транспортирования и хранения. Пропан, бутан и их смеси можно использовать при сварке стали толщиной до 4...6 мм (в отдельных случаях до 12 мм), сварке и пайке чугуна, цветных металлов и сплавов, кислородной и кислородно-флюсовой резке (разделительной и поверхностной) сталей, наплавке, поверхностной закалке, металлизации, напылении пластмасс, нагреве при гибке, правке, формовке и других подобных процессах.

При разделительной резке, сварке цветных металлов, пламенной закалке и пайке для замены 1 т карбида кальция (что эквивалентно примерно 235 м³ ацетилена) требуется 0,3 т сжиженного газа.

Коксовый газ получают в процессе коксования каменного угля. Средний состав коксового газа: 50...59 % H_2 ; 25...30 % CH_4 ; 1,8...3,0 % C_2H_4 и других непредельных углеводородов; 5...7 % CO ; 6...13 % N_2 и CO_2 ; 0,5...0,8 % O_2 .

Сланцевый газ получают при газификации горючих сланцев. Его примерный состав: 25...40 % H_2 ; 14...17 % CH_4 ; 10...20 % CO ; 10...20 % CO_2 ; 4...5 % C_2H_6 и другие углеводороды; 22...25 % N_2 ; до 1 % O_2 . Характеристика этих газов приведена в табл. 5.3. Температура пламени газов в смеси с кислородом составляет 2000 °С.

Коксовый и сланцевый газы к постам газопламенной обработки подают по трубопроводу. Их используют при сварке легкоплавких

Таблица 5.3. Показатели коксового и сланцевого газов

Показатель	Коксовый газ	Сланцевый газ
Плотность при 20 °С и 0,1 МПа, кг/м ³	0,40 ... 0,55	0,74 ... 0,93
Низшая теплота сгорания, кДж/м ³	14 700 ... 17 600	12 600 ... 14 300

металлов, пайке, разделительной и поверхностной кислородной и кислородно-флюсовой резке и других процессах, для которых достаточна температура пламени приблизительно 2 000 °С.

Городской газ имеет плотность 0,84 ... 1,05 кг/м³, низшую теплоту сгорания 18 800 ... 21 000 кДж/м³, температуру газокислородного пламени 2 000 °С. Состав газа утверждается соответствующими организациями с учетом используемых источников его получения. Области применения городского газа те же, что и для коксового газа.

Пиролизный и нефтяной газы — это смесь газообразных продуктов термического разложения нефти, нефтепродуктов и мазута при 720 ... 740 °С в ретортах. Выход газа составляет 0,35 ... 0,4 м³ на 1 кг нефти. Состав зависит от состава нефти и режима ее переработки. При заполнении баллонов газ находится частично в сжиженном состоянии. Отбор газа приводит к изменению его состава вследствие испарения в первую очередь более летучих компонентов. Для выравнивания состава газа и предупреждения частичной конденсации в трубопроводах и шлангах перед горелкой иногда приходится устанавливать промежуточный ресивер вместимостью 40 дм³, в котором газ находится под избыточным давлением (0,3 ... 0,4 МПа); из ресивера газ через регулятор давления поступает в горелку или резак. Характеристика этих газов представлена в табл. 5.4. Температура пламени газов составляет 2 297 °С.

К газовым постам нефтяной газ подается в баллонах под давлением до 15 ... 16,5 МПа, пиролизный газ — по трубопроводу под давлением в установке для разложения нефти. Области применения этих газов те же, что и при использовании пропана и пропанобутановых смесей. Ввиду более низкой температуры пламени пиролизный и нефтяной газы можно использовать для сварки стали толщиной не более 3 мм.

Таблица 5.4. Показатели пиролизного и нефтяного газов

Показатель	Пиролизный газ	Нефтяной газ
Плотность при 20 °С и 0,1 МПа, кг/м ³	0,65 ... 0,85	0,63 ... 1,43
Низшая теплота сгорания, кДж/м ³	31 400 ... 33 500	41 000 ... 56 600
Коэффициент замены ацетилена	1,6	1,2

В качестве горючего для получения подогревательного пламени при кислородной резке в ряде случаев используют пары горючих жидкостей — бензина и керосина. Хотя пламя от осветительного керосина имеет меньшую температуру, чем от 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.

5.3. ИНЕРТНЫЕ ЗАЩИТНЫЕ ГАЗЫ

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.

Наиболее универсальными защитными газами, как отмечалось, являются аргон и гелий. Для защиты некоторых металлов, например меди, в качестве инертного газа может быть использован и азот.

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 рассматривают так же, как и инертные газы, хотя это и не совсем точно.

Аргон и гелий не образуют с другими элементами химических соединений, поэтому они и считаются инертными. В большинстве металлов эти газы практически нерастворимы.

Гелий добывают из природных газов посредством их сжижения после предварительной очистки от примесей (оксида и диоксида углерода, метана и других углеводородов). Очистка от примесей азота осуществляется глубоким охлаждением. В гелии высокой чистоты и техническом, применяемом для сварки, остаются небольшие количества азота, водорода, кислорода, углеводородов, неона и влаги. Добывание гелия из воздуха нецелесообразно вследствие его малого там количества (0,00046 об. %, или 0,00007 мас. %).

Содержание аргона в воздухе довольно значительно (0,9325 об. %, или 1,2862 мас. %), поэтому его промышленное производство основано на получении из воздуха. При этом отделение аргона от основных составляющих воздуха производится методами ректификации

Таблица 5.5. Физические свойства некоторых газов

Газ	Относительная атомная масса	Относительная молекулярная масса	Плотность при 0 °С и 1 033 Па, 10 ⁻³ кг/м ³	Температура кипения, °С	Теплопроводность, Вт/(м·С)	Удельная теплоемкость 1 т при 20 °С, Дж/(кг·С)
Аргон	39,944	—	1,7833	-185,5	187	0,542
Гелий	4,003	—	0,17847	-268,9	1 558	5,213
Азот	14,008	28,016	1,251	-196	251	—
Кислород	16	32	1,429	-183	262	0,9149
Водород	1,008	2,016	0,08988	-259	1 754	—
Воздух	—	29	1,293	-190	280	1,006

в разделительных колоннах. Полученный таким образом «сырой» аргон содержит все же значительное количество примесей, в частности кислорода. Дальнейшая очистка его осуществляется беспламенным соединением кислорода с добавляемым водородом в присутствии катализаторов. В чистом аргоне в качестве примесей остается небольшое количество азота, кислорода и влаги.

Аргон — бесцветный, неядовитый газ, почти в 1,5 раза тяжелее воздуха (физические свойства аргона и других газов представлены в табл. 5.5). В металлах аргон нерастворим как в жидком, так и в твердом состоянии.

Поскольку для сварки различных сплавов цветных металлов требуется аргон различной чистоты, то в соответствии с ГОСТ 10157—79 «Аргон газообразный и жидкий. Технические условия» промышленность выпускает его трех марок (табл. 5.6). Аргон марки А подходит для сварки активных и редких металлов и их сплавов (Ti, Zr, Nb); марки Б — для сварки сплавов на основе магния, алюминия; марки В — для сварки коррозионно-стойких, жаропрочных и окислостойких сталей.

Для сварки плавящимся электродом углеродистых легированных сталей необходим аргон, содержащий 1...5 % O₂. Такой аргон выпускают по составу близким к составу аргона марки В.

Гелий в промышленности применяют в меньших объемах, чем аргон. Гелий не образует химических соединений с большинством элементов, это бесцветный газ, без запаха и вкуса, не ядовит, хорошо диффундирует через твердые тела, значительно легче воздуха и

Таблица 5.6. Массовая доля компонентов газообразного аргона, %

Марка	Ar, не менее	O ₂	N ₂	Влага
		не более		
А	99,99	0,003	0,01	0,03
Б	99,96	0,005	0,04	
В	99,90	0,005	0,10	

аргона (см. табл. 5.5). Гелий получают в основном из природных газов путем их сжижения. Для сварки используют гелий высокой чистоты и сорта А по ТУ 51-940—80 «Гелий газообразный (сжатый). Технические условия» (табл. 5.7).

Транспортируется и хранится гелий в газообразном состоянии в стальных баллонах при давлении 15 МПа или в сжиженном состоянии при давлении не выше 2 МПа. Стоимость гелия значительно выше, чем аргона, поэтому применяют его в основном при сварке химически чистых и активных материалов и сплавов, а также сплавов на основе алюминия и магния.

На практике изредка применяют смеси аргона и гелия (50 % Ar + 50 % He и 40 % Ar + 60 % He). Такой состав получают смешиванием этих газов, отбираемых из двух отдельных баллонов.

Азот в сварочном производстве находит ограниченное применение. Его используют в соответствии с ГОСТ 2993—74 «Азот га-

Таблица 5.7. Массовая доля компонентов гелия, %

Сорт	He, не менее	H ₂	N ₂	O ₂	Угледорода	Ne ₂
		не более				
Высокой чистоты	99,985	0,0025	0,005	0,002	0,003	0,002
А	99,950	0,008	0,02	0,005	0,007	—

Таблица 5.8. Объемная доля компонентов азота, %

Состояние	N ₂ , не менее	O ₂ , не более
Газообразный:		
электровакуумный	99,9	0,1
1-го сорта	99,5	0,5
2-го сорта	99,0	1,0
Жидкий	96,0	4,0

зообразный и жидкий. Технические условия» для сварки меди и ее сплавов, в отношении которых азот является инертным газом. По отношению к большинству других металлов азот является активным газом, часто вредным, и от него стремятся избавиться. Азот — бесцветный газ, не ядовит (см. табл. 5.5 и 5.8).

Таблица 5.9. Выбор состава защитных газов для сварки различных металлов и сплавов

Свариваемый металл	Толщина, мм	Защитный газ при сварке	
		вольфрамовым электродом	плавящимся электродом
Низкоуглеродистая сталь	≤ 2,0	Комбинированная защита (Ar, CO ₂)	Ar + 10 % CO ₂
Низко- и средне-легированные стали	≤ 3,0	Комбинированная защита (Ar, CO ₂); Ar (сорт В)	Ar + 10 % CO ₂ ; Ar (сорт Г)
	≥ 3,0	—	Ar (сорт Г)
Коррозионно-стойкие хромоникелевые высоколегированные стали	≤ 3,0	Ar (сорт В); He; комбинированная защита (Ar, CO ₂)	Ar (сорт В и Г); He; Ar + 10 % CO ₂
	≥ 3,0	—	Ar (сорт В и Г); He
Жаропрочные хромоникелевые сплавы	Любая	Ar (сорт Б); He	Ar (сорт Б); He
Алюминий и алюминиевые сплавы	≤ 10,0	Ar (сорт Б)	Ar (сорт А и Б)
	≥ 10,0	Ar (сорт Б)	Ar (сорт Б); Ar + 60 % He
Магниевые сплавы	Любая	Ar (сорт Б); He	Ar (сорт А и Б)
Титан и его сплавы	»	Ar (сорт А)	Ar (сорт А)
Цирконий, молибден, ниобий и другие химически активные металлы	»	Ar (сорт А)	Ar (сорт А)
Медь и сплавы на ее основе		Ar (сорт В); He; комбинированная защита (Ar, N ₂)	Ar (сорт В); He; N ₂ ; Ar + (20...30) % N ₂

Рекомендации по применению инертных защитных газов и смесей их с активными газами для сварки различных металлов и сплавов приведены в табл. 5.9.

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. При необходимости добавок относительно небольших количеств газа (примерно до 10 % в смеси) применяют ротаметры с эбонитовым поплавком, позволяющие точнее измерять небольшие потоки газа.

Обычные расходы инертных защитных газов при дуговой сварке зависят от свариваемого металла, способа и режима сварки. 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 $(0,04 \dots 0,17) \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$. Расход аргона при сварке плавящимся электродом в зависимости от свариваемого металла и силы сварочного тока обычно составляет $(0,017 \dots 0,07) \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$. Кроме того, при сварке химически активных металлов, например титана и его сплавов, необходимо 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, присутствующего в защитной струе.

В ряде случаев требуется защита от окисления и азотирования при сварке металла не только со стороны действующего источника теплоты, но и с обратной стороны. Такая защита тоже может обеспечиваться дополнительной струей инертного газа, причем его расход составляет 50 % от расхода сварочной горелки.

5.4. ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ ЗАЩИТНЫЕ ГАЗЫ

В ряде случаев более перспективной защитой при дуговой сварке, главным образом плавящимся электродом, являются химически активные газы. Наиболее распространенным из них является углекислый газ CO_2 . При использовании электродов с покрытиями фтористо-кальциевого типа газовая фаза, выделяемая при сварке, состоит из углекислого газа (от распада карбонатов) и паров металла. Эта газовая фаза оттесняет основные массы воздуха, защищая металл от азотирования, но приводит к некоторому его окислению (прежде всего за счет диссоциации CO_2), которое может быть исключено рациональным введением раскислителей. Так поступают

при использовании углекислого газа в качестве защитного в процессе дуговой механизированной сварки плавящимся голым электродом. При этом из сопла (мундштука) горелки, охватывающего поступающую в дугу голую электродную проволоку, вытекает струя CO_2 , достаточная для оттеснения воздуха от реакционной зоны сварки. Эти защитные свойства струи, как отмечалось выше, зависят от физических свойств газа, в частности от соотношения его плотности и плотности воздуха.

Плотность углекислого газа достаточно высока, приблизительно в 1,5 раза больше, чем у воздуха, что позволяет обеспечивать 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.

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 раскислители, например обычных низкоуглеродистых, раскисление осуществляется применением электродных проволок, содержащих 0,8 % Si и 1,2... 2,2 % Mn, или дополнительным введением флюсов, шлакующих оксиды.

Углекислота при нормальном давлении находится 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. Чаще всего потребителям ее поставляют в виде жидкости. Жидкая углекислота бесцветна. Ее удельный вес значительно изменяется в зависимости от величины давления.

При испарении 1 л жидкой углекислоты при 0°C и атмосферном давлении 760 мм рт. ст. (101 325 Па) 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 $12,5\text{ м}^3$ газа.

При использовании пищевой углекислоты в баллонах для удаления примесей воздуха рекомендуется выпускать в атмосферу первые порции газа, а также воду после отстаивания баллона в перевернутом положении (вентилем вниз), осторожно открывая вентиль. После удаления воды и первых загрязненных объемов газовой фазы такая пищевая углекислота дает достаточно удовлетворительные результаты при сварке.

В ряде случаев при сварке к защитному углекислому газу добавляют кислород. Так, в ряде случаев оказывается полезной добавка к защитному углекислому газу кислорода. Смеси CO_2 с 10 и даже 20 %

кислорода при соответствующих составах электродных проволок широко применяют в Японии и некоторых других странах. Такие смеси обеспечивают более стабильные свойства, особенно в условиях большой влажности атмосферы при сварке. Их получают теми же способами, что и смеси с инертными газами.

Наиболее распространенными из активных защитных газов при дуговой сварке являются углекислый газ и его смеси с добавками кислорода.

5.5. ФЛЮСЫ ДЛЯ ДУГОВОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ, ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОЙ, ГАЗОВОЙ И ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ

К флюсам для автоматической и полуавтоматической сварки плавящимся электродом предъявляется ряд общих требований: обеспечение стабильности горения дуги и процесса сварки; получение заданного химического состава металла сварных швов и их свойств; обеспечение устойчивого процесса формирования металла шлаков; получение швов без трещин и с минимальным (допустимым) количеством шлаковых включений и пористостью; легкая отделяемость шлаковой корки от поверхности швов.

Выполнение этих требований зависит от состава свариваемого металла и применяемой электродной проволоки. В связи с этим и флюсы, используемые для автоматической и полуавтоматической сварки, весьма разнообразны.

В целом для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей требуется небольшое легирование металла швов. Оно достигается взаимодействием металла с расплавленными шлаками, содержащими соединения марганца и кремния. Обычно такими соединениями являются оксиды, а флюсы представляют собой достаточно равномерные по составу шлаковые системы, полученные предварительным сплавлением исходных материалов. Такие флюсы называются плавлеными.

В настоящее время для сварки под флюсом низкоуглеродистых сталей применяют три основных состава сварочных материалов:

- низкоуглеродистая нелегированная электродная проволока и высокомарганцовистый (35...45 % MnO) флюс с достаточно большим процентом кремнезема (40...45 % SiO₂). В этом случае необходимое легирование обеспечивается кремнемарганцевостановительными процессами взаимодействия металл — флюс;
- низкоуглеродистая проволока, легированная марганцем примерно до 2 %, и высококремнистый (кислый) флюс: 40 % SiO₂,

Таблица 5.10. Химический состав флюсов для сварки низкоуглеродистых и конструкционных низколегированных сталей, мас. %

Марка флюса	SiO ₂	MnO	CaF ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Mn ₂ O ₃	TiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	S	P
										не более			
ОСЦ-45	38... 44	38... 47	6...9	≤ 6,5	≤ 2,5	≤ 5,0	—	—	—	—	2,0	0,15	0,15
АН-348А	41... 44	34... 38	4...5,5	≤ 6,5	5,5... 7,5	≤ 4,5	—	0,1... 0,3	—	—	2,0	0,15	0,12
АН-348АМ	41... 44	34... 38	3,5... 4,5	≤ 6,5	5,5... 7,5	≤ 4,5	—	0,1... 0,3	—	—	2,0	0,15	0,12
ОСЦ-45М	38... 44	38... 47	6...9	≤ 6,5	≤ 2,5	≤ 5,0	—	—	—	—	2,0	0,15	0,10
ФЦ-9	37... 42	36... 41	2...3	≤ 5,0	≤ 2,0	9...13	—	—	—	1,5	—	0,15	0,10
ЛПИ-609	33... 40	35... 40	≤ 2,5	4,5...6	≤ 2,0	9...12	0,4... 0,8	—	1,5...6	≤ 1,5	≤ 1,5	0,15	0,15
АН-51	31... 33	5...6,5	7...8,5	12... 15	14... 17	21... 23	—	—	1,5... 2,5	1,5	—	0,15	0,05

не более 15 % MnO. Легирование металла шва марганцем осуществляется электродной проволокой, а кремнием — из флюса за счет кремневосстановительных процессов;

- среднемарганцовистая электродная проволока (содержание марганца примерно 1 %) или низкоуглеродистая проволока из кипящей стали (содержание марганца 0,4... 0,5 %, кремния менее 0,03 %) и среднемарганцовистый (примерно 30 % MnO) кислый флюс.

Некоторые составы флюсов из этой группы приведены в табл. 5.10.

Для уменьшения окисления металла за счет его реакций с флюсом при сварке легированных сталей применяют флюсы с ограниченной концентрацией SiO₂ и MnO (табл. 5.11).

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 %), обладающего большим средством к кислороду, чем железо, а также титан, алюминий и другие легирующие элементы, которые интенсивно реагируют с рядом оксидов, входящих в состав флюса.

В результате таких реакций металл обедняется необходимыми легирующими (Cr, Ti и пр.) и обогащается другими элементами (Si, Mn), которые по своему действию не заменяют выгоревшие, а в ряде случаев могут быть даже вредными.

Для сварки таких сталей применяют флюсы, в основном состоящие из очень стойких оксидов — CaO, MgO, Al₂O₃ — и галогенида CaF₂. Количество SiO₂, допускаемое в таких флюсах, определяется необходимостью обеспечения их технологических свойств. При этом должна учитываться и склонность металла шва к порообразованию, усиливающаяся при содержании оксида кремния во флюсе не более 3 %. Характерные флюсы данной группы приведены в табл. 5.12.

Флюсы с малым содержанием оксида кремния SiO₂ склонны к гидратации и повышению содержания в них конституционной, в частности цеолитной, воды, которая 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 повышения температуры прокатки и используются только в свежeproкаленном состоянии. Обычно прокатка таких флюсов производится при температурах 800... 900 °С.

Однако даже флюсы типа 480Ф-6, 480Ф-7 не являются полностью неокислительными. В частности, наличие в их составе SiO₂ мо-

Таблица 5.11. Химический состав флюсов для сварки легированных сталей, мас. %

Марка флюса	SiO ₂	MnO	CaF ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O + Na ₂ O	FeO	S	P
								не более		
АН-10	20...23	29...33	18...24	3...7	≤ 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	≤ 0,5	35...46	≤ 8,0	11...14	28...34	—	1,5	0,05	0,05

Таблица 5.12. Химический состав флюсов для сварки высоколегированных сталей, мас. %

Марка флюса	SiO ₂	MnO	CaF ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	S	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	≤ 0,5	19...23	16...20	13...16	39...44	1,0	0,08	0,05
480Ф-6	≤ 4,0	≤ 0,3	45...60	16...23	≤ 3,0	20...27	1,5	0,05	0,04
480Ф-7	≤ 4,0	≤ 0,3	60...75	9...16	≤ 3,0	12...20	1,5	0,05	0,04

жет привести к заметному окислению элементов с высоким сродством к кислороду. Например, в коррозионно-стойких аустенитных сталях таким элементом является титан.

Совершенно неокислительными могут быть флюсы, не содержащие оксидов, в частности состоящие из галогенидов. Бескислородные флюсы разрабатывают на базе плавикового шпата. Хотя их технологические характеристики заметно хуже, чем у флюсов, содержащих и оксиды, и галогениды, они получили в ряде случаев практическое применение. Например, при сварке титановых сплавов, как при автоматической под флюсом, так и при электрошлаковой, используют флюсы на базе CaF_2 с некоторыми добавками. В связи с относительно невысокой температурой плавления этих флюсов (ниже $1\,318\text{ }^\circ\text{C}$ — температуры плавления CaF_2) происходит ограничение возможных сварочных режимов. 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 (при малом времени взаимодействия металла и флюса).

Флюсы для газовой сварки алюминия (табл. 5.13) вводят с присадочным прутом или предварительно наносят на кромки свариваемого изделия в виде паст, разведенных в воде или спирте. При сварке меди флюсы в виде порошка предварительно наносят на присадку, смоченную раствором жидкого стекла, или же нагретый пруток опускают во флюс. Можно также засыпать флюс на предварительно нагретые кромки свариваемых деталей на ширину 10...15 мм. В случае нанесения на пруток флюса в виде пасты, замешанной на жидком стекле, проволоку предварительно протравливают в азотной кислоте и промывают в воде. При газовой сварке меди и особенно латуни можно применять газообразные флюсы. К ним относятся пары азеотропного раствора борно-метилового эфира с метиловым спиртом, которые через флюсопитатель падают непосредственно в пламя горелки, окрашивая его в зеленый цвет (спектральный цвет бора). Фторидно-хлоридные флюсы используют для газовой сварки алюминиевых бронз (табл. 5.14). Фториды и хлориды щелочных металлов частично растворяют Al_2O_3 , благодаря чему происходит раскисление металла.

Для дуговой сварки алюминия и его сплавов плавящимся электродом по слою флюса (полуоткрытой дугой) применяют в основном плавящиеся флюсы (табл. 5.15). Флюс марки АН-А1 используют для сварки технического алюминия (как в плавленом, так и в не-

Таблица 5.13. Химический состав флюсов для газовой сварки легких металлов и сплавов, %

Компонент	Марка флюса									
	для алюминия и его сплавов							для магния и его сплавов		
	АФ-1А	АН-А201	ВАМИ	КМ-1	№ 1	№ 2	№ 3	№ 1	№ 2	№ 3
Хлорид натрия NaCl	28	—	30	20	33	19	41	—	40	—
Хлорид калия KCl	50	—	50	45	45	29	51	—	—	—
Хлорид лития LiCl	14	15	—	—	15	—	—	—	40	—
Хлорид бария BaCl ₂	—	70	—	20	—	48	—	15	—	—
Фторид натрия NaF	8	—	—	15	—	—	8	—	—	—
Фторид кальция CaF ₂	—	—	—	—	—	4	—	7	20	15
Фторид лития LiF	—	15	—	—	—	—	—	31	—	19
Фторид калия KF	—	—	—	7	—	—	—	—	—	—
Фторид алюминия AlF ₃	—	—	—	—	—	—	—	33	—	—
Фторид магния MgF ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25
Фторид бария BaF ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	33
Криолит Na ₃ AlF ₆	—	—	20	—	—	—	—	14	—	5
Оксид магния MgO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3

Таблица 5.14. Химический состав флюсов для газовой сварки алюминиевых бронз, %

Компонент	Номер флюса		
	1	2	3
Хлорид натрия NaCl	30	45	28
Хлорид калия KCl	45	30	50
Хлорид лития LiCl	15	10	14
Фторид натрия NaF	—	—	8
Фторид калия KF	7	15	—
Фосфат натрия Na ₃ PO ₄	3	—	—

плавленом виде). Для изготовления направленного флюса (механической смеси) все исходные материалы предварительно высушивают при температурах 350 ... 400 °С. Хлорид натрия и хлорид калия измельчают. Материалы просеивают через сито с 400 отв./см² и более. Просеянные частицы взвешивают и затем тщательно перемешивают.

При изготовлении плавленого флюса после высушивания хлорид натрия и хлорид калия измельчают до размера зерен 1,5 ... 2 мм в поперечнике. Шихту расплавляют в графитовых тиглях при температурах 750 ... 800 °С. После расплавления и небольшой выдержки в печи флюс тонким слоем выливают на противень из окалиностойкой стали. Остывший флюс дробят на куски и измельчают на валках до размера зерен 0,2 ... 1 мм. Плавленый флюс обеспечивает меньшую склонность швов к образованию пор, но уступает механической смеси по формированию швов. Основные компоненты флюса AN-Al не увлажняются, однако примесь хлорида магния в поваренной соли может придать ему некоторую гигроскопичность.

Для алюминиево-магниевых сплавов используют флюсы AN-A4, 48-АФ-1 и МАТИ-10; для алюминиево-марганцевых — флюс МАТИ-1а. Керамический флюс марки ЖА-64 предназначен для механизированной сварки технического алюминия закрытой дугой. Однако для получения коррозионно-стойких соединений из алюминия особой чистоты марки АД00 этот флюс не пригоден из-за перехода кремния в металл шва при восстановлении его из SiO₂. Флюс ЖА-64А лишен этого недостатка, поскольку содержание в нем SiO₂ не превосходит 1 %. Такой флюс применяют для получения качественных швов с высокой коррозионной стойкостью и электрической проводимостью на алюминии АД00.

Керамические флюсы пригодны для автоматической сварки алюминия толщиной 30 мм и более. Флюсы ЖА-64 и ЖА-64А заме-

Таблица 5.15. Химический состав флюсов для сварки алюминия и его сплавов, %

Компонент	Марка флюса							
	для сварки по слою флюса					для сварки под флюсом		для электрошлаковой сварки
	АН-1А	АН-А4	48-АФ-1	МАТИ-1а	МАТИ-10	ЖА-64	ЖА-64А	АН-301, АН-302, АН-304
Хлорид натрия NaCl	20	—	—	—	—	17	15	—
Хлорид калия KCl	50	57	47	47	30	43	38	20... 60
Хлорид лития LiCl	—	—	—	8	—	—	—	10... 40
Хлорид бария BaCl ₂	—	28	47	—	68	—	—	5... 30
Фторид натрия NaF	—	—	—	42	—	—	—	—
Фторид калия KF	—	—	2	—	—	—	—	—
Фторид лития LiF	—	7,5	—	—	—	—	—	2... 20
Фторид кальция CaF ₂	—	—	—	—	—	—	3	—
Фторид алюминия AlF ₃	—	7,5	—	—	—	—	—	—
Криолит Na ₃ AlF ₆	30	—	—	3	2	36	43	—
Фторцирконат калия KZrF ₄	—	—	2	—	—	—	—	—
Песок кварцевый SiO ₂	—	—	—	—	—	4	≤ 1	—
Оксид хрома CrO ₃	—	—	2	—	—	—	—	—

шивают на водном растворе карбоксиметилцеллюлозы (14... 16 % к массе сухой шихты), протирают через сито с размером ячейки 2,5×2,5 мм и затем прокачивают при температурах 280... 320 °С. Прокаленный флюс просеивают через сито с размером ячейки 3×3 мм.

К флюсам для электрошлаковой сварки также предъявляют специфические требования, в частности по электропроводности (что обеспечивает получение устойчивого процесса сварки и необходимое тепловыделение в ванне) и вязкости (очень короткие шлаки с низкой вязкостью могут, отжимая формирующие устройства

Таблица 5.16. Химический состав флюсов для электрошлаковой сварки, мас. %

Марка флюса	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	CaF ₂	TiO ₂	FeO	S	P
							не более		
АН-25	6...9	—	12... 15	2...4	33... 40	30... 40	—	0,1	0,1
АН-30	—	35	—	—	65	—	—	—	—
480Ф-6	—	—	20	—	80	—	—	—	—

от изделия при кристаллизации корки шлака, создавать щели, через которые вытекает жидкий шлак).

В ряде случаев для электрошлаковых процессов применяют флюсы, обладающие достаточной электропроводностью и при довольно низких температурах. Обычно это флюсы со значительным содержанием TiO₂. В табл. 5.16 приведен состав такого специального флюса марки АН-25 и некоторых других.

Однако при электрошлаковой сварке возможно применение флюсов, предназначенных и для дуговой сварки, в частности АН-348, АН-22, 480Ф-6.

Для электрошлаковой сварки пластинчатым электродом алюминия АД1, а также сплавов типа АМц, АМг6 пригодны плавленые флюсы марок АН-А301, АН-А302 и АН-А304. Сварку меди толщиной до 20...25 мм производят с использованием стандартных плавленых флюсов АН-348А, ОСЦ-45, АН-20С, АН-26С, предназначенные для сварки сталей (табл. 5.17). При сварке меди под такими кислыми флюсами в металл шва переходят кремний и марганец,

Таблица 5.17. Химический состав флюсов для автоматической сварки меди и ее сплавов плавящимся электродом, %

Марка флюса	SiO ₂	MnO	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	CaF ₂	Fe ₂ O ₃	K ₂ O, Na ₂ O
АН-348А	41... 44	34... 38	До 6,5	5...7,5	До 4,5	4...5,5	До 2	—
ОСЦ-45	38... 44	38... 44	До 6,5	До 2,5	До 5,0	6...9	До 2	—
АН-20С	19... 24	До 0,5	3...9	9...13	27... 32	25... 33	До 1	2...3
АН-26С	29... 33	2,5... 4,0	4...8	15... 18	19... 23	19... 23	До 1,5	—

восстановленные из шлака. В результате ухудшаются теплофизические свойства и повышается удельное электросопротивление шва по сравнению с основным металлом. Применение бескислородных фторидных флюсов, например марки АН-М1 (55 % NaF, 5 % BaF₂), позволяет устранить этот недостаток. Благодаря повышенной чистоте металла шва при сварке под флюсом АН-М1 удельное электросопротивление соединений снижается примерно в 1,5 раза, а теплопроводность повышается в 2 раза по сравнению со швами, выполненными под кислым флюсом АН-348А.

Для электродуговой сварки меди пригодны и керамические флюсы: ЖМ-1 для сварки меди и К-13МВТУ для сварки меди со сталью. Состав флюса ЖМ-1, %: мрамор — 28,0; полевой шпат — 57,6; плавиковый шпат — 8,0; древесный уголь — 2,2; борный шлак — 3,5; алюминий (порошок) — 0,8. Состав флюса К-13МВТУ, %: глинозем — 20; плавиковый шпат — 20; кварцевый песок — 8...10; магнезит — 15; мел — 15; бура безводная — 15...19; алюминий (порошок) — 3...5.

С увеличением толщины свариваемых изделий из меди и сплавов на ее основе указанные выше флюсы становятся ограниченно пригодными, так как не обеспечивают требуемой плотности и необходимой пластичности сварных швов. Снизить пористость при сварке меди и хромовой бронзы толщиной 30...40 мм позволяет смесь, состоящая из 80 % флюса АН-26С и 20 % флюса АН-20С. Лучшие результаты по плотности швов обеспечивает флюс сухой granulации марки АН-М13.

При аргонодуговой сварке неплавящимся электродом тонколистовой меди (толщиной 2...6 мм) с целью повышения качества швов применяют активирующий флюс-пасту АН-М15.

Для электрошлаковой сварки меди используют легкоплавкий флюс на фторидной основе марки АН-М10 (системы NaF—LiF—CaF₂). Для плазменно-дуговой сварки хромовой бронзы разработана присадочная порошковая проволока марки ПП-БрХТ12-2, содержащая 10...15 % Cr и 1,5...3 % Ti. Сварка никеля может производиться под флюсами двух типов: керамическим (ЖН-1) и плавленными фторидными бескислородными и высокоосновными (АН-Ф5, АН-Ф7, АН-8, 48-ОФ-6, АН-29, АН-292 и др.) (табл. 5.18). Флюс ЖН-1 используют при сварке никеля марок Н-1, Н-2, НП-1 и НП-2. В случае применения при сварке проволоки марки НМц-2,5 производят перерасчет состава флюса, из которого исключается металлический марганец. Плавленные фторидные флюсы (например, АН-Ф7) применяют при дуговой и электрошлаковой сварке и никелевых сплавов.

Плавленные бескислородные фторидно-хлоридные флюсы серии АНТ предназначены для автоматической сварки титана и его сплавов (табл. 5.19).

Таблица 5.18. Химический состав флюсов для автоматической сварки никеля и его сплавов плавящимся электродом, %

Марка флюса	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaF ₂	MnO	CaO	MgO	NaF	Na ₂ O	Mn	Ti	Al
ЖН-1	18...20	14...16	50...55	—	7...9	—	—	5...6	4...5	1,5...2,0	5,5...6,5
АНФ-5	≤ 2	—	75...80	—	—	—	17...25	—	—	—	—
АНФ-7	≤ 2	—	65...75	—	18...30	—	—	—	—	—	—
АНФ-8	≤ 2	25...35	45...55	—	12...18	—	—	—	—	—	—
48-ОФ-6	≤ 4	20...27	45...60	До 0,3	16...23	До 3	—	—	—	—	—
АН-29	—	40...50	10...15	—	35...45	—	—	—	—	—	—
АН-292	≤ 1,5	58...61	—	—	33...37	4...7	—	—	—	—	—

Таблица 5.19. Сварочные флюсы для сварки титана и его сплавов

Марка флюса	Толщина свариваемого металла, мм	Области применения
АНТ-1	3...7	Сварка плавящимся электродом под флюсом
АНТ-3	6...12	
АНТ-7	8...20	
АНТ-23А	0,8...3	Сварка неплавящимся электродом низколегированных α - и ($\alpha + \beta$)-сплавов
ФАН-1	3...6	Сварка неплавящимся электродом средне- и высоколегированных ($\alpha + \beta$)- и β -сплавов
АНТ-2	Более 40	Электрошлаковая сварка титана и низколегированных титановых сплавов
АНТ-4	Более 40	Электрошлаковая сварка высокопрочных титановых сплавов
АНТ-6	Более 40	

К особенностям этих флюсов относятся сравнительно высокие температуры плавления (выше 1 400 °С). Данные флюсы принадлежат к категории «коротких» шлаков. Шихта флюсов подготавливается из химически чистых компонентов. Титановые присадочные порошковые проволоки позволяют сваривать неплавящимся электродом за один проход сплавы толщиной до 16 мм. При этом можно получать швы без усиления (проволока ППТ-1) и с усилением (проволоки ППТ-2 и ППТ-3).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие горючие газы применяют при газопламенной сварке?
2. В каком виде хранится ацетилен в баллонах?
3. Что такое коэффициент замены ацетилена?
4. Для чего при газопламенной сварке применяют флюсы?
5. Какие требования предъявляются к флюсам для газопламенной сварки?
6. Какие марки флюсов применяют для сварки углеродистых и легированных сталей?
7. Как осуществляют местную защиту газами зоны дуговой сварки?
8. Какие газы используют для защиты зоны сварки?
9. Какие флюсы применяют для электрошлаковой сварки сталей и цветных металлов?

Список литературы

1. *Гуревич С.М.* Справочник по сварке цветных металлов / С.М.Гуревич ; отв. ред. В.Н.Замков. — 2-е изд., перераб. и доп. — Киев : Наукова думка, 1990. — 512 с.
2. *Закс И.А.* Электроды для дуговой сварки цветных металлов и сплавов : справ. пособие / И.А.Закс. — СПб. : Стройиздат СПб., 1999. — 192 с.
3. *Лихачев В.Л.* Электродуговая сварка : пособие для сварщиков и специалистов сварочного производства / В.Л.Лихачев. — М. : СОЛОН-Пресс, 2006. — 640 с.
4. *Полевой Г.В.* Газопламенная обработка металлов : учебник / Г.В.Полевой, Г.К.Сухинин. — М. : Издательский центр «Академия», 2005. — 336 с.
5. Пористые сетчатые материалы / [Ю.И.Синельников, А.Ф.Третьяков, Н.И.Матурин и др.]. — М. : Metallurgia, 1983. — 64 с.
6. Промышленные алюминиевые сплавы : справ. изд. / [С.Г.Алиева, М.Б.Альтман, С.М.Амбарцумян и др.]. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Metallurgia, 1984. — 528 с.

Предисловие.....	4
Глава 1. Стали для изготовления сварных конструкций.....	7
1.1. Строение сварных соединений.....	7
1.2. Конструкционные стали.....	12
1.3. Углеродистые конструкционные стали.....	14
1.4. Низко- и среднелегированные закаливающиеся стали.....	28
1.5. Низкоуглеродистые бейнитно-мартенситные стали.....	36
1.6. Жаропрочные перлитные стали.....	40
1.7. Высокохромистые мартенситные, мартенситно-ферритные и ферритные стали.....	43
1.7.1. Состав и свойства.....	43
1.7.2. Мартенситные хромистые стали.....	45
1.7.3. Мартенситно-ферритные стали.....	48
1.7.4. Ферритные хромистые стали.....	51
1.8. Высоколегированные аустенитные стали и сплавы.....	53
Глава 2. Цветные металлы и сплавы для сварных конструкций.....	71
2.1. Медь и медные сплавы.....	71
2.1.1. Свойства и свариваемость меди.....	71
2.1.2. Свойства и свариваемость безоловянных бронз.....	76
2.1.3. Свойства и свариваемость оловянных бронз.....	85
2.1.4. Свойства и свариваемость латуней.....	90
2.1.5. Медно-никелевые сплавы.....	101
2.2. Никель и его сплавы.....	107
2.3. Алюминий и алюминиевые сплавы.....	111
2.4. Магний и магниевые сплавы.....	137
2.5. Титан и титановые сплавы.....	142
Глава 3. Порошковые и композиционные материалы.....	149
3.1. Порошковые материалы.....	149
3.1.1. Общие сведения.....	149
3.1.2. Конструкционные материалы.....	151
3.1.3. Пористые фильтрующие материалы.....	152
3.1.4. Пористые сетчатые материалы.....	156
3.2. Гранулированные алюминиевые сплавы.....	164
3.3. Композиционные материалы.....	166
3.3.1. Общая характеристика и классификация.....	166

3.3.2. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы.....	169
3.3.3. Волокнистые композиционные материалы	171
3.3.4. Слоистые композиционные материалы.....	175
3.3.5. Свойства и применение композиционных материалов.....	176
3.4. Пеноалюминий	181
Глава 4. Металлические сварочные материалы.....	187
4.1. Сварочная проволока	187
4.2. Наплавочная стальная проволока	204
4.3. Чугунные прутки для сварки и наплавки.....	204
4.4. Порошки для наплавки.....	211
4.5. Самозащитная и порошковая проволоки	213
4.6. Наплавочные ленты	214
4.7. Присадочные материалы для электрошлаковой сварки	215
4.8. Присадочные кольца и вставки для выполнения корневого шва при сварке труб.....	216
4.9. Покрытые электроды.....	218
4.9.1. Общие сведения	218
4.9.2. Электроды для сварки сталей	224
4.9.3. Электроды для сварки меди	232
4.9.4. Электроды для сварки безоловянных бронз.....	236
4.9.5. Электроды для сварки оловянных бронз.....	242
4.9.6. Электроды для сварки латуней.....	243
4.9.7. Электроды для сварки медно-никелевых сплавов	247
4.9.8. Электроды для сварки никеля.....	253
4.9.9. Электроды для сварки алюминиевых сплавов	258
4.9.10. Электроды для сварки магния и магниевых сплавов	262
4.10. Неплавящиеся электроды для дуговой сварки.....	263
4.11. Материалы электродов для машин электрической контактной сварки.....	266
Глава 5. Неметаллические сварочные материалы.....	270
5.1. Общие сведения о применении неметаллических сварочных материалов	270
5.2. Газы, применяемые при газопламенной обработке металлов	272
5.3. Инертные защитные газы.....	278
5.4. Химически активные защитные газы	282
5.5. Флюсы для дуговой автоматической, полуавтоматической, газовой и электрошлаковой сварки.....	284
Список литературы.....	296

Учебное издание

**Овчинников Виктор Васильевич,
Гуреева Марина Алексеевна**

Современные материалы для сварных конструкций

Учебное пособие

2-е издание, стереотипное

Редактор *Л. А. Осипова*
Технический редактор *Н. И. Горбачева*
Компьютерная верстка: *В. А. Крыжко*
Корректоры *Е. В. Кургяшова, С. Ю. Свиридова*

Изд. № 702214193. Подписано в печать 28.07.2016. Формат 60×90/16.
Гарнитура «Балтика». Усл. печ. л. 19,0.

ООО «Издательский центр «Академия». www.academia-moscow.ru
129085, Москва, пр-т Мира, 101В, стр. 1.
Тел./факс: (495) 648-0507, 616-00-29.

Санитарно-эпидемиологическое заключение № РОСС RU. ПЩ01. Н00695 от 31.05.2016.