

**Министерство образования Белгородской области
Областное государственное профессиональное образовательное
учреждение
“Губкинский горно-политехнический колледж”**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

**ПМ 01 Подготовка и осуществление технологических процессов изготовления
сварных конструкций**

КУРС ЛЕКЦИЙ

для студентов специальности

22.02.06 “Сварочное производство”

профиль: технический

очная форма обучения

Учебно-методическое пособие «Курс лекций по ПМ 01 Подготовка и осуществление технологических процессов изготовления сварных конструкций» составлено в соответствии с ФГОС СПО, рабочей программой и требованиям к содержанию и уровню подготовки выпускников. Предназначено для изучения МДК 01.01 Технология сварочных работ, МДК 01.02. Основное оборудование для производства сварных конструкций, обучающимися 2-3 курсов специальности 22.02.06 «Сварочное производство».

РАССМОТРЕННО

на заседании предметно-цикловой комиссии
в сфере строительства, электроэнергетики и
машиностроения

Протокол № _____ от _____
_____ /И.А. Крайнева. /

СОГЛАСОВАНО

заместитель директора
_____ /О.Н. Мелихова/

« ____ » _____ 2026г.

Организация-разработчик: ОГАПОУ «Губкинский горно-политехнический колледж»

Разработчик:

Жукова Н.В., преподаватель ОГАПОУ «Губкинский горно-политехнический колледж»

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Раздел 1 Освоение теоретических основ сварки плавлением.....	7
1.1 Выполнение различных способов сварки металлов	7
1.1.1 История развития сварки плавлением. Преимущества.....	7
1.1.2 Виды электрической сварки плавлением и их особенности	11
1.1.3 Классификация способов электрической сварки плавлением в зависимости от степени механизации, рода тока, полярности типа дуги, свойств электрода, способа защита зоны сварки, условий наблюдения за процессом сварки и другие.....	17
1.2 Основы электрической дуговой сварки плавлением	19
1.2.1 Основные сведения об электрической дуге. Понятие электрического разряда	19
1.2.2 Процессы, протекающие в катодной, анодной зоне и столбе дуги и их характеристика.....	26
1.2.3 Влияние рода тока, полярности тока, состава газов. Статическая вольт-амперная характеристика дуги и её влияние на условия горения дуги.....	28
1.2.4 Влияние электромагнитных сил на сварочную дугу. Понятие магнитного дутья	31
1.2.5 Электрическая, тепловая и эффективная тепловая мощность дуги. КПД дуги	43
1.2.6 Основные показатели процесса сварки: коэффициенты плавления, наплавки, потерь. Погонная энергия.....	46
1.2.7 Нагрев тела неподвижным и подвижным источником теплоты. Расчет длины и времени существования сварочной ванны при дуговой сварке	49
1.3 Изготовление и применение сварочных материалов.....	53
1.3.1 Сварочная проволока: область применения, классификация, требования к ней. ГОСТ.....	53
1.3.2 Определение и классификация электродов. ГОСТ. Типы электродов и их буквенно-цифровое обозначение. Условные обозначения покрытых электродов	68

1.3.3	Флюсы. Общие сведения о флюсах. Классификация флюсов. Основные марки флюсов	90
1.3.4	Защитные газы. Общие сведения о защитных газах. Классификация защитных газов.....	99
1.4	Формирование и кристаллизация металла шва	108
1.4.1	Особенности металлургических процессов при сварке.....	108
1.4.2	Влияние кислорода, азота, водорода на свойства металла шва и качество сварного соединения	111
1.4.3	Металлургические процессы при сварке толстопокрытыми электродами.....	115
1.4.4	Металлургические процессы при сварке под флюсом и в защитных газах	123
1.4.5	Кристаллизация металла шва. Механизм кристаллизации	129
1.4.6	Образование трещин и газовых пор в металле шва... ..	137
1.4.7	Старение и коррозия металла сварных швов. Межкристаллитная коррозия.....	139
1.5	Образование сварочных напряжений и деформаций.....	145
1.5.1	Классификация, причины возникновения сварочных напряжений и деформаций	145
1.5.2	Основные причины возникновения напряжений и деформаций.....	146
1.5.3	Схема образования продольных и поперечных деформаций	147
1.5.4	Схемы образования сварочных напряжений и деформаций. Деформации и напряжения при неравномерном нагреве.....	153
1.5.5	Напряжения, возникающие вследствие структурных превращений в металле.....	155
1.5.6	Расчет сварочных деформаций	156
1.5.7	Деформации и напряжения при сварке стыковых и тавровых соединений	158
1.5.8	Организационные мероприятия по уменьшению напряжений и деформаций при сварке	162
1.5.9	Технологические мероприятия по уменьшению напряжений и деформаций при сварке	162
1.5.10	Методы снятия внутренних напряжений и способы исправления полученных сварочных деформаций.....	166
	Список использованных источников	169

ВВЕДЕНИЕ

Сварка является одним из ведущих технологических процессов обработки металлов. Большие преимущества сварки обеспечивают ее широкое применение в народном хозяйстве. Без сварки не может быть производство судов, мостов, самолетов, турбин, котлов, трубопроводы, химическое оборудование и другие конструкции.

Выпуск сварных конструкций и уровень механизации сварочных работ растет из года в год. Получаемая за счет применения сварки ежегодная экономия в промышленности дает большие прибыли.

Применение сварки способствует совершенствованию и развитию различных отраслей промышленности.

Сварка — это технологический процесс получения неразъемного соединения посредством установления межатомных и межмолекулярных связей между свариваемыми частями изделия при их нагреве (местном или общем), и/или пластическом деформировании.

Сварка применяется для соединения металлов и их сплавов, термопластов во всех областях производства и в медицине.

При сварке используются различные источники энергии: электрическая дуга, газовое пламя, лазерное излучение, электронный луч, трение, ультразвук. Развитие технологий позволяет в настоящее время осуществлять сварку не только в условиях промышленных предприятиях, но в полевых и монтажных условиях (в степи, в поле, в открытом море и т. п.), под водой и даже в космосе.

В настоящее время традиционные методы потеснили лазерные методы. Им предрекают большое будущее. Управлять процессом можно будет дистанционно. Роботы приходят на смену сварщикам. Разработано устройство для автоматической подачи присадочного материала в зону шва, с высокой точностью регулируется тонкий луч, расплавляющий металл.

Второе направление развития технологии высокотемпературного соединения металлов — использование оптико-волоконных материалов. Это позволит увеличивать коэффициент полезного действия силового оборудования:

генераторов, преобразователей. Постепенно будет повышаться мощность выходного тока, сейчас максимальная 6 кВт, ее планируется довести до 25 кВт и выше.

Постепенно лазерная технология вытеснит газовый метод сварки. Будут создаваться гибкие модули, использовать которые можно будет в любых погодных условиях. Будет снижаться трудоемкость технологических процессов, разрабатываться новые методы контроля качества высокотемпературного соединения металлов.

Во многих отраслях необходимы сварочные работы, их можно встретить буквально повсюду: от ремонта инженерных коммуникаций до изготовления космических кораблей. Поэтому старые сварочные предприятия продолжают функционировать и вслед за ними открываются новые заводы. При этом возрастает нехватка грамотных специалистов, выполняющих работу качественно и быстро. К новым сотрудникам предъявляются строгие требования, которые постоянно усложняются.

Данный лекционный материал способствует изучению теоретических основ сварки различных способов для различных материалов и практическое применение при выполнении курсового проекта и выпускной квалификационной работы.

РАЗДЕЛ 1 ОСВОЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

1.1 Выполнение различных способов сварки металлов

1.1.1 История развития сварки плавлением. Преимущества

В развитие сварочной науки и техники особый вклад внесли российские ученые и инженеры - В. В. Петров (1761 - 1834), Н. Н. Бенардос (1842-1905), Н. Г. Славянов (1854-1897).

Василий Владимирович Петров впервые в мире в 1802 г. обнаружил явление электрического дугового разряда от построенного им сверхмощного "вольтового столба", который состоял из 2100 пар разнородных кружков - элементов (медь + цинк), проложенных бумажными кружками, смоченными водным раствором нашатыря.

Проделав большое количество опытов со своей батареей, он показал возможность использования электрической дуги для освещения и плавления металлов. К моменту открытия дугового разряда электротехника только начинала создаваться. Открытие В. В. Петрова опередило время практического применения дуги для сварки на 80 лет. Его осуществил Николай Николаевич Бенардос - автор многих изобретений в области электротехники.

Н. Н. Бенардос предложил и произвел в 1880-1890 гг. все основные виды дуговой сварки: плавящимся и неплавящимся электродами дугой прямого и косвенного действия, ручную, полуавтоматическую и автоматическую, незащищенной дугой и в среде защитного газа.

Н. Н. Бенардос в 1887 г. предложил основные виды электроконтактной сварки - точечную и роликовую.

После детальной разработки своего изобретения Н. Н. Бенардос получил на него патенты в Англии, Бельгии, Германии, Италии, Франции, США и в других странах.

В 1886 г. он получил русский патент на "Способ соединения и разъединения металлов непосредственным действием электрического тока". Н. Н. Бенардос

применил созданный им способ не только для сварки, но и для наплавки и резки металлов.

Почти одновременно с Н. Н. Бенардосом работал другой крупнейший изобретатель - Николай Гаврилович Славянов, много сделавший для развития дуговой сварки.

Николай Гаврилович Славянов в конце 1888-1889 гг. осуществил и широко внедрил электродуговую отливку металлических изделий и сварку плавящимся металлическим электродом, разработал основы металлургии сварочного процесса и, в частности, осуществил сварку под шлаковой защитой.

Обладая глубокими знаниями металлургии и электротехники, Н. Г. Славянов разработал способ дуговой сварки металлическим электродом с защитой сварочной зоны слоем порошкообразного вещества (флюса) и первый в мире механизм "электроплавильник" - для полуавтоматической подачи электродного прутка в зону сварки.

Способ сварки плавящимся металлическим электродом получил название "дуговая сварка по способу Славянова". Первая публичная демонстрация нового способа состоялась в 1888 г. в Перми.

Изобретения Н. Г. Славянова получили мировое признание, они были запатентованы во многих странах Европы, в Америке. В 1893 г. на Всемирной выставке в Чикаго Н. Г. Славянов был награжден дипломом и золотой медалью за изобретение электродуговой сварки металлов.

Н. Г. Славянов научился рассчитывать и строить электрические приборы и машины, в том числе крупные по тем временам динамо-машины для нужд заводского производства, и в частности специальный сварочный генератор.

Эти машины в дальнейшем стали технической базой разработки блестящих изобретений дуговой электросварки и электрической отливки, прототипа электрошлаковой сварки и электрошлакового переплава сталей.

Славянов впервые с помощью нового способа сварил вал паровой машины. Свой способ он назвал "электрической отливкой металлов", электросварщика - "электроотливщиком", а организованный им впервые в мире электросварочный цех - "электролитейным". Здесь были подготовлены первые электросварщики.

Под "электрической отливкой" изобретатель понимал дуговую электрическую сварку металлическим электродом, а под термином "сварка" - только сварку давлением или пластическую сварку без расплавления свариваемого металла, например, широко применяемую тогда кузнечную сварку.

В 30-х годах XX в. были организованы исследовательские лаборатории, институты. Началась подготовка специалистов по сварке. В этот период большой вклад в развитие и внедрение сварочных процессов внес другой наш соотечественник - Евгений Оскарович Патон. Он разработал и приступил к реализации программы совершенствования оборудования и технологий сварки, особо добиваясь улучшения качества соединений. В созданной им лаборатории, преобразованной в 1934 г. в научно-исследовательский институт (первую в мире специализированную организацию по изучению проблем сварки), одним из направлений стало развитие электродуговой сварки металлическими электродами и электродной проволокой.

К концу 30-х годов исследователи вернулись к идее Славянова защищать зону дуги насыпным флюсом, а электрод подавать без специальных защитных материалов.

Сварка по сравнению с другими способами соединения обеспечивает следующие преимущества:

1) Экономия металла вследствие полного использования рабочих сечений элементов в соединительных узлах сварных конструкций; придания конструкциям более целесообразной формы в соответствии с действующими нагрузками; резкого уменьшения веса соединительных элементов в сварных узлах; применения более тонкостенных конструкций, отсутствия расхода металла на литники и прибыли, уменьшения брака и припусков на механическую обработку при замене литья сваркой.

В сварных, конструкциях вес металла сварных швов обычно составляет от 1 до 2%, в то время как в клепаных вес заклепок и косынок — не менее 4% от веса изделия. Сварка дает до 25% экономии металла по сравнению с клепкой, по сравнению с литьем экономия металла достигает: при замене стального литья

сваркой до 25—30%, при замене чугунного литья сваркой стального проката— до 50-60%.

Использование сварки на строительстве зданий позволяет уменьшить вес стальных конструкций на 15%, облегчает изготовление и увеличивает жесткость всей конструкции. При сооружении доменных печей применение сварки вместо клепки позволяет экономить от 12 до 15% металла, в конструкциях стропильных ферм—10—20%, в конструкциях подъемных кранов -15—20%.

2) Сокращение сроков работ и уменьшение стоимости изготовления конструкций за счет снижения расхода металла и уменьшения трудоемкости работ. Так, например, постройке крупных доменных печей на металлургических заводах сварка кожуха печи из стальных листов, электрошлаковым способом осуществляется за 1/2 месяца. Сварка такого кожуха ручным способом занимает более месяца; а клепка — 7—9 месяцев.

Выгодно применять сварку при индивидуальном и мелкосерийном производстве, так как при этом можно обходиться более простыми и недорогими приспособлениями и технологической оснасткой.

3) Возможность изготовления изделий сложной формы путем сварки их из отдельных штампованных или литых элементов вместоковки или отливки изделия в целом. Такие конструкции называются соответственно штампованными или сварнолитыми и широко применяются в автомобилестроении, самолётостроении, вагоностроении и других областях.

Применение таких конструкций дает экономию металла и трудозатрат. При помощи сварки можно изготавливать детали из металла, прошедшего различную предварительную обработку, например, сваривать прокатанные профили со штампованными, литыми или кованными заготовками. Можно сваривать и разнородные металлы: нержавеющие стали с углеродистыми, медь со сталью и др.

При изготовлении конструкций сложной формы использование сварки вместоковки и литья дает большой экономический эффект. Например, производительность труда при изготовлении сварных конструкций в 2 раза выше, чем литых и кузнечно-штампованных, а условия труда значительно лучше.

Капитальные вложения на тонну сварных конструкций в 1,5—2 раза меньше, а себестоимость в 1,3—1,6 раза ниже, чем в литейном производстве. Снижая вес, повышается надежность и долговечность изделий.

4) Удешевление технологического оборудования. Сварочное оборудование сравнительно несложно, относительно дешево и весьма высокопроизводительно. Это сокращает капитальные затраты на строительство металлообрабатывающих заводов и ускоряет их ввод в действие.

5) Облегчение, комплексной механизации массового производства однотипных сварных изделий, возможность создания поточного производства со 100%-ной механизацией и автоматизацией производственного цикла, что резко увеличивает съём продукции с единицы производственной площади цеха.

6) Возможность широкого использования в сварных конструкциях прогрессивных современных видов материалов: высокопрочных сталей, гнутых облегченных профилей, многослойного листового проката, легких сплавов, сверхчистых металлов и др.

7) Облегчение изготовления микроминиатюрных узлов и деталей в производстве некоторых видов изделий - полупроводниковых приборов и пр.

8) Возможность широкого использования сварки, наплавки и резки при ремонте, где эти способы обработки металла позволяют быстро и с наименьшими затратами восстанавливать изношенное, вышедшее из строя оборудование и разрушенные сооружения.

9) Герметичность и надежность сварных соединений.

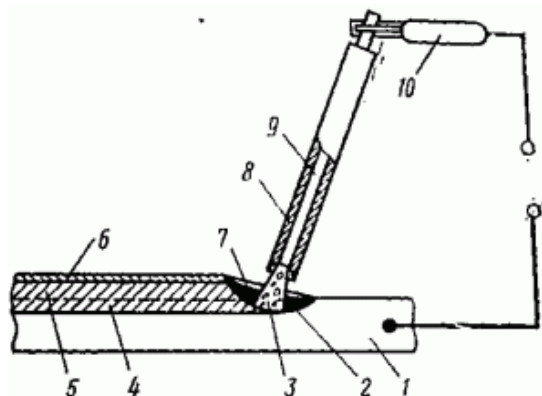
10) Уменьшение производственного шума и улучшение условий труда в цехах.

1.1.2 Виды электрической сварки плавлением и их особенности

1) Ручная дуговая сварка штучным электродом.

Теплота, необходимая для расплавления основного металла и электродного стержня, образуется в результате горения электрической (сварочной) дуги, обладающей высокой температурой (до 4000—6000°C). Расплавленные основной и электродный металлы перемешиваются в сварочной ванне и по мере продвижения дуги быстро затвердевают, образуя сварной шов. Электродное

покрытие, нанесенное на металлический стержень электрода, состоит из различных компонентов, которые при расплавлении создают, шлаковую и газовую защиту сварочной ванны от вредного влияния кислорода и азота воздуха (рисунок 1.1).



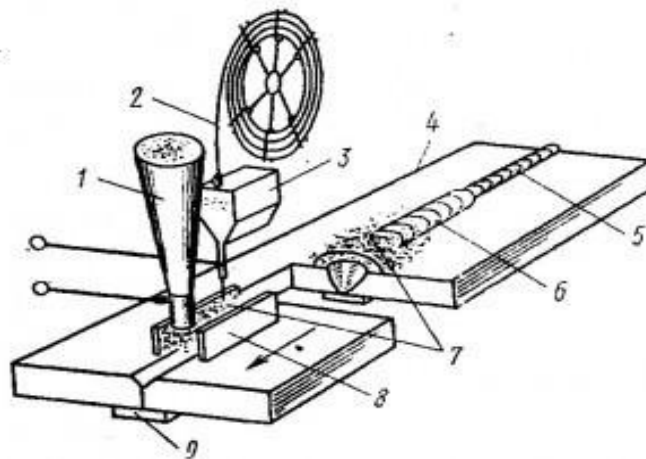
1 — основной металл, 2 — сварочная ванна, 3 — электрическая дуга, 4 — проплавленный металл, 5 — наплавленный металл, 6 — шлаковая корка, 7 — жидкий шлак, 8 — электродное покрытие, 9 — металлический стержень электрода, 10 — электрододержатель.

Рисунок 1.1 - Ручная дуговая сварка штучным электродом

2) Автоматическая дуговая сварка под флюсом. Электрическая дуга горит под слоем зернистого флюса, который предохраняет расплавленный металл от воздуха и при необходимости легирует его. Электродная проволока подается в дугу автоматически с помощью сварочной головки, снабженной электродвигателем.

Флюс сыпается в зону сварки под действием собственного веса. Одновременно с этим вся установка передвигается вдоль свариваемого шва. При этом виде сварки обеспечиваются высокая производительность и хорошее качество шва (рисунок 1.2).

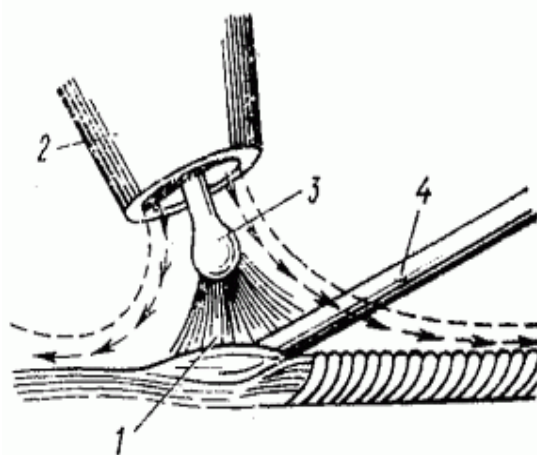
3) Дуговая сварка в защитном газе неплавящимся электродом. Электрическая дуга горит между вольфрамовым электродом и основным металлом (рисунок 1.3).



- 1 — бункер с флюсом, 2 — электродная проволока, 3 — сварочная головка,
 4 — основной металл, 5 — сварной шов, 6 — шлаковая корка,
 7 — не расплавленный флюс, 8 — ограничители флюса, 9 — медная
 пластина-подкладка

Рисунок 1.2 - Автоматическая дуговая сварка под флюсом

Сварочная ванна защищается от окисления инертным защитным газом (аргоном, гелием), который оттесняет воздух от места сварки. Для заполнения шва в сварочную ванну вводится присадочный материал. Сварка может производиться ручным, механизированным и автоматическим способами. Этот метод широко применяют при сварке высоколегированных сталей, цветных металлов и их сплавов, а также активных и редких металлов.



- 1 — электрическая дуга, 2 — газовое сопло, 3 — вольфрамовый электрод,
 4 — присадочная проволока.

Рисунок 1.3 - Дуговая сварка в защитном газе неплавящимся электродом

4) Дуговая сварка в защитном газе плавящимся электродом

Электродная проволока с помощью подающих роликов непрерывно подается в зону сварки со скоростью ее плавления. Сварочную ванну от воздуха защищают как инертным, так и активным газом (например, углекислым). Углекислый газ применяют при сварке углеродистых и легированных сталей, инертные газы — при сварке высоколегированных сталей и цветных металлов (рисунок 1.4). Сварку можно выполнять механизированным и автоматическим способами.

5) Сварка трехфазной дугой. К двум электродам и изделию подводят переменный ток от трехфазного сварочного трансформатора. При этом возникают три дуги, горящие в одном сварочном фокусе: по одной между каждым электродом и изделием и одна между самими электродами. При горении дуг выделяется большое количество теплоты, что увеличивает производительность процесса сварки.

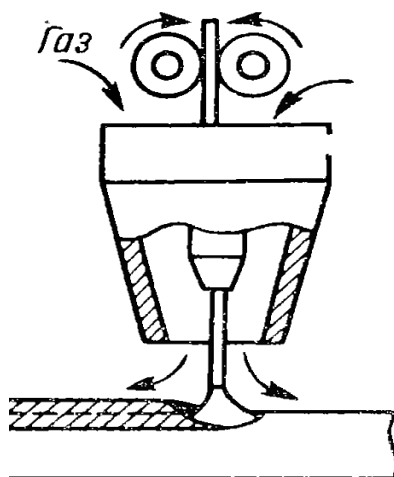
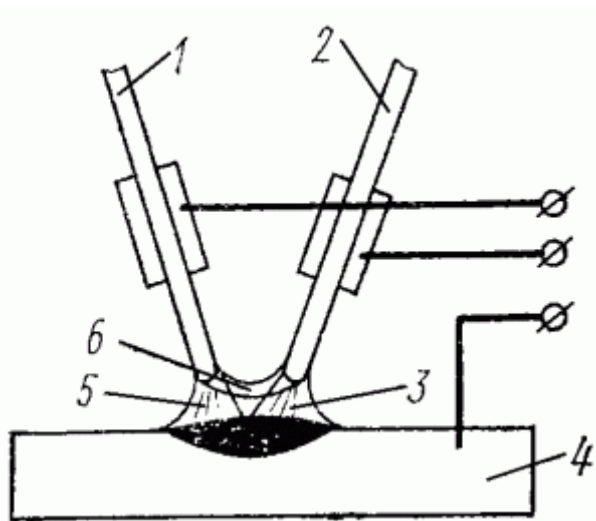


Рисунок 1.4 - Дуговая сварка в защитном газе плавящимся электродом

Сварку можно выполнять как ручным, так и автоматическим способом. Схема сварки трехфазной дугой приведена на рисунке 1.5. 6) Электрошлаковая сварка. Отличие от дуговой сварки для плавления основного и электродного металлов используется теплота, выделяющаяся при прохождении сварочного тока через расплавленный электропроводный шлак (флюс). После затвердевания основного и электродного металлов образуется сварной шов. Сварку выполняют

при вертикальном расположении свариваемых деталей с большим зазором между ними. Для формирования шва по обе стороны зазора устанавливают медные ползуны, охлаждаемые водой.



1, 2 — плавящиеся электроды, 3, 5, 6 — сварочные дуги, 4 — основной металл.

Рисунок 1.5 - Сварка трехфазной дугой

Для свободного перемещения ползунов вверх сборка под сварку производится с помощью специальных (сборочных) скоб. Электрошлаковую сварку применяют при соединении деталей большой толщины (от 30 до 1000 мм и более). Схема электрошлаковой сварки приведена на рисунке 1.6.

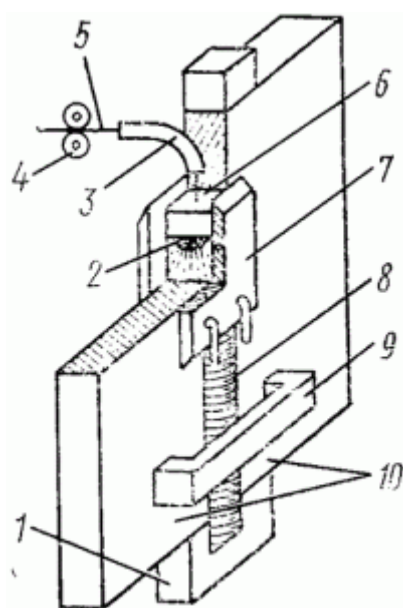
7) Характеристика и сущность процесса сварки в контролируемой атмосфере

Сварка в камерах с контролируемой атмосферой применяется для соединения окисляющих металлов и их сплавов. В такой камере имеется возможность создания атмосферных и инертных газов, что обеспечивает высокие механические свойства сварного соединения.

Подготовка к сварке заключается в следующем: свариваемые изделия устанавливают в камере, куда также загружают электроды и сварочную проволоку.

После чего загрузочные люки и отверстия для перчаток герметизируют, и в камере с помощью вакуумных насосов создают вакуум до 13 мПа. Для предохранения перчаток от разрыва воздух откачивают с наружной стороны люков, перекрывающих отверстия с перчатками. После откачки камеру заполняют инертным газом до атмосферного давления.

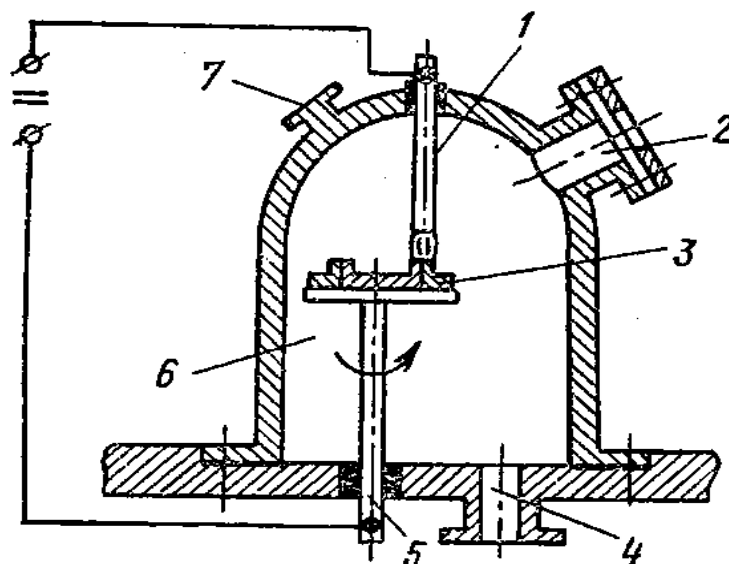
Сварку в камере производят на тех же режимах, что и при сварке в инертных газах на воздухе. Пластичность металла сварного соединения приближается к пластичности основного металла.



1 — начальная скоба для возбуждения процесса сварки, 2 — металлическая (сварочная) ванна, 3 — токоподводящий мундштук, 4 — подающие ролики, 5 — электродная проволока, 6 — шлаковая ванна, 7 — медные формующие ползуны, 8 — сварной шов, 9 — сборочная скоба, 10 — свариваемые детали.

Рисунок 1.6 - Электрошлаковая сварка

Автоматическая дуговая сварка в камерах с контролируемой атмосферой обеспечивает более стабильное качество сварных соединений.



1 — электрод; 2 — смотровое окно; 3 — свариваемое изделие; 4 — патрубок для присоединения насоса; 5 — ось поворотного стола; 6 — камера; 7 — канал для подачи защитного газа.

Рисунок 1.7 – Сварка в контролируемой атмосфере

При электронно-лучевой сварке в вакууме энергия, необходимая для нагрева и плавления металла, получается в результате интенсивной бомбардировки места сварки быстро движущимися в вакууме электронами

Вакуум порядка 13×10^{-13} Па, создаваемый в сварочной камере, (рисунок 1.7), необходим для того, чтобы резко уменьшить расход электронов на ионизацию и удалить из зоны сварки газы, имеющие большое сродство к свариваемым металлам.

1.1.3 Классификация способов электрической сварки плавлением в зависимости от степени механизации, рода тока и полярности, типа дуги, свойств электрода, способа защиты зоны сварки, условий наблюдения за процессом сварки и другие

1) В зависимости от источника нагрева различают:

а) электрическая дуговая сварка — источником тепла для расплавления кромок и электрода является тепло выделяемое электрической дугой;

б) электрошлаковая сварка – источником тепла является тепло выделяемое расплавленным кипящим шлаком при пропускании через него электрического тока;

в) электронно-лучевая сварка – источником тепла для нагрева и расплавления кромок, соединяемых деталей является мощный поток электронов, испускаемых раскаленным катодом в вакууме;

г) лазерная сварка – источником тепла является сфокусированный мощный поток частиц фотонов, которые при соударении со свариваемыми кромками деталей расплавляют их.

2) По степени механизации сварка подразделяется:

а) Ручная дуговая сварка:

-сварка неплавящимся электродом по методу Бенардоса Н.Н.;

-сварка плавящимся электродом по методу Славянова Н.Г.

Их преимущество – большая маневренность при малой производительности.

б) Полуавтоматическая – при которой часть операций связанных с выполнением сварного шва, выполняется автоматически: механизированная подача проволоки, газа или флюса, а перемещение дуги вручную.

в) Автоматическая – все операции связанные с выполнением сварного шва - механизированные.

3) По роду тока различают:

а) Сварка на постоянном токе. При постоянном токе различают две полярности:

-прямая полярность: «минус» на электроде; «плюс» на изделии.

-обратная полярность: «плюс» на электроде; «минус» на изделии.

б) Сварка на переменном токе. Дуга горит неустойчиво и применяется в судостроении ограничено.

4) Сварка в зависимости от типа дуги:

а) дуга прямого действия – изделие включено в сварочную цепь;

б) дуга косвенного действия – в специальном держателе два электрода. К ним подведено питание от источника тока. Само изделие в цепь не включено.

5) В зависимости от свойств электрода сварку различают:

а) Сварка плавящимися стальными электродами:

- если электродов в держателе два и каждый получает независимое питание, то сварка называется *двухдуговая*.

- если в держателе два электрода, но подключены они к одной фазе, то сварка называется *двухэлектродной*.

- если в держателе несколько электродов и подключены они к одной фазе, то сварка называется *многоэлектродной* (пучком электродов).

б) Сварка неплавящимися электродами (угольные, графитовые, вольфрамовые).

Сварка этими электродами может выполняться с присадочным материалом и без него.

6) По способу защиты сварочной ванны различают:

а) Сварка открытой дугой (угольным электродом).

б) Сварка защищенной дугой (металлический электрод с обмазкой).

в) Сварка с газовой защитой (зона дуги защищена инертным или активным газом).

г) Сварка с флюсовой защитой.

д) Сварка с комбинированной защитой (газ в сочетании с флюсом).

7) По условиям наблюдения за процессом сварки:

а) Сварка открытой дугой (ручная, в защитном газе).

б) Сварка закрытой дугой (дуга горит под слоем гранулированного флюса).

в) Сварка полуоткрытой дугой (сварка алюминия по флюсу).

Вопросы для самоконтроля

1) История развития сварки плавлением. Преимущества.

2) Виды электрической сварки плавлением и их особенности.

3) Характеристика основных видов сварки плавлением: технологические особенности проведения различных видов сварки, их назначения, область применения

4) Сущность основных видов электрической сварки плавлением от источников нагрева.

5) Характеристика механизированных способов сварки.

Литература: [1, глава 1 и 2], [5 , глава 1 и 2]

1.2 Основы электрической дуговой сварки плавлением

1.2.1 Основные сведения об электрической дуге

Электрическая сварочная дуга представляет собой устойчивый длительный электрический разряд в газовой среде между твердыми или жидкими электродами, находящимися под напряжением, сопровождающийся выделением большого количества теплоты. Электрический разряд в газе есть электрический ток, проходящий через газовую среду благодаря наличию в ней свободных электронов, а также отрицательных и положительных ионов, способных перемещаться между электродами под действием приложенного электрического поля (разности потенциалов между электродами).

Условия зажигания и горения дуги. Сварочная дуга должна иметь определенные технологические условия, обеспечивающие ее быстрое зажигание, устойчивое горение, малую чувствительность к изменениям ее длины в определенных пределах, быстрое повторное зажигание (возбуждение) после обрыва, необходимое проплавление основного металла.

Условия зажигания и устойчивого горения дуги зависят от таких факторов, как состав обмазки при сварке штучными электродами, род тока (постоянный или переменный), прямая или обратная полярность при сварке на постоянном токе, диаметр электрода, температура окружающей среды.

Для зажигания дуги требуется напряжение большее по величине, чем напряжение для горения дуги. Напряжение, подводимое от источника питания к электродам при разомкнутой сварочной цепи, является напряжением холостого хода. При сварке на постоянном токе напряжение холостого хода не превышает 90 В, а на переменном токе – 80 В. В момент горения дуги напряжение,

подаваемое от источника питания, значительно снижается и достигает величины, необходимой для устойчивого горения дуги. В процессе горения дуги ток и напряжение находятся в определенной зависимости

Напряжение, подводимое от источника питания к электродам при разомкнутой сварочной цепи, является напряжением холостого хода. При сварке на неизменном токе напряжение холостого хода не превосходит 90 В, а на переменном токе - 80 В. В момент горения, дуги напряжение, подаваемое от источника питания, существенно понижается и добивается величины, нужной для устойчивого горения дуги. В процессе горения дуги ток и напряжение находятся в определенной зависимости. Зависимость напряжения дуги от тока в сварочной цепи, при условии неизменной длины дуги, именуют статической вольт-амперной чертой дуги.

С повышением тока напряжение существенно миниатюризируется, потому что при повышении силы тока возрастает поперечное сечение столба дуги и его проводимость. Вольт-амперная черта будет падающей и дуга пылает нестабильно. При увеличении тока напряжение сохраняет постоянную величину, потому что поперечное сечение столба дуги и площади анодного и катодного пятен растут пропорционально току. Вольт-амперная черта будет жесткой, дуга пылает стабильно, и обеспечивается обычный процесс сварки. Повышение тока вызывает возрастание напряжения, потому что повышение плотности тока больше определенного значения не сопровождается повышением катодного пятна из-за ограниченного поперечного сечения электрода, при всем этом вольт-амперная черта будет растущей. Дуга с вольт-амперной чертой используется при сварке под флюсом и в защитных газах.

Таким образом, первым условием зажигания и горения дуги является наличие электронного источника питания дуги достаточной мощности, позволяющего стремительно нагревать катод до высочайшей температуры при возбуждении дуги. Более полная стабилизация горения дуги достигается также при достаточной степени ионизации столба дуги, потому вторым условием для зажигания и горения дуги является наличие ионизации столба дуги за счет введения в состав покрытия штучных электродов либо в состав флюсов таких

частей, как алюминий, натрий, барий, калий, литий, кальций и др. Эти элементы владеют низким потенциалом ионизации и в момент зажигания дуги содействуют резвому ее возникновению. Третьим условием стойкости горения дуги при сварке на переменном токе является наличие в сварочной цепи дросселя (завышенной индуктивности). Это разъясняется тем, что в сварочной цепи переменного тока, имеющей только омическое сопротивление, в процессе горения дуги образуются обрывы (100 обрывов дуги за секунду при промышленной частоте переменного тока 50 Гц).

При замыкании накоротко сварочной цепи получают раскаленный конец электрода, при этом в силу вступает закон Джоуля-Ленца. Выделяемое количество тепла достаточно для мгновенного расплавления конца электрода. Часть металла на конце электрода превращается в пар. При отрыве конца электрода от изделия атомы приходят в возбужденное состояние и с их крайних орбит срываются электроны проводимости.

Электрон — это частица весьма малой массы, несущая элементарный (наименьший, неделимый) электрический заряд отрицательного знака. Масса электрона равна $9,1 \cdot 10^{-28}$ г; элементарный электрический заряд равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. *Ионом* называется атом или молекула вещества, имеющая один или несколько элементарных зарядов. *Положительные ионы* имеют избыточный положительный заряд; они образуются при потере нейтральным атомом или молекулой одного или нескольких электронов из своей наружной (валентной) оболочки (электроны, вращающиеся в валентной оболочке атома, связаны слабее, чем электроны внутренних оболочек, и поэтому легко отрываются от атома при столкновениях или под действием облучения). *Отрицательные ионы* имеют избыточный отрицательный заряд; они образуются, если атом или молекула присоединяет к своей валентной оболочке лишние электроны.

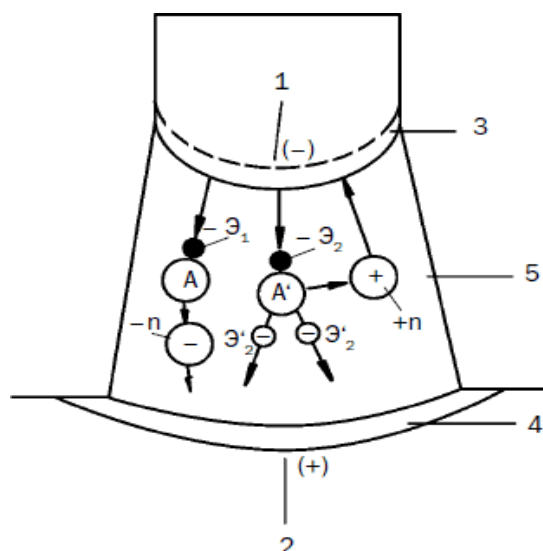
Процесс, при котором из нейтральных атомов и молекул образуются положительные и отрицательные ионы, называется *ионизацией*, а воздушный дуговой промежуток будет ионизированным. Ионизированный воздушный дуговой промежуток — плазма проводящая ток. Ионизация, вызванная в некотором объеме газовой среды, называется *объемной ионизацией*. Объемная

ионизация, полученная благодаря нагреванию газа до очень высоких температур, называется *термической ионизацией*.

Процесс ионизации газа наглядно показан на рисунке 1.8, на котором ясно видно, что в результате бомбардировки электрически нейтральных атомов газа (A , A') быстрыми электронами ($\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$), испускаемыми катодом (это явление называется эмиссией электронов), первые теряют один или несколько электронов. При этом их скорость уменьшается, но они продолжают движение к аноду под воздействием его электрического поля. A атомы вместе с электронами, утратившими часть электричества, превращаются в положительно заряженные ионы ($+I$), которые начинают перемещаться к катоду. При столкновении с ним положительные ионы выбивают из него электроны и частично захватывают их, становясь нейтральными атомами, а остальные электроны движутся к аноду. Отрицательно заряженные ионы ($-I$) появляются тогда, когда атомы захватывают свободные электроны. Поскольку не все элементы способны на это, отрицательных ионов в ионизированном газе, как правило, меньше, чем положительных.

Описанный процесс, в ходе которого в среде газа или пара образуются положительно и отрицательно заряженные частицы, называется *объемной ионизацией*. Кстати, она возможна не только от соударения частиц, ее причиной может быть энергия светового излучения. Кроме того, ионизация газа или пара происходит при их нагревании до температуры $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (*термическая ионизация*), когда повышается скорость движения частиц и возрастает число их столкновений. Положительные ионы могут образоваться из атомов всех элементов, а отрицательные – не из всех. Легче всего отрицательные ионы образуют галоиды, кислород, щелочные элементы.

Пары этих элементов, находясь в дуговом промежутке, обеспечивают легкость возбуждения и устойчивое горение дуги. Это свойство щелочных металлов объясняется тем, что атомы этих элементов (K , Na , Ba , Li) обладают наименьшим потенциалом ионизации. Поэтому для повышения устойчивости горения электрической дуги эти вещества вводят в зону дуги в виде электродных покрытий или флюсов.

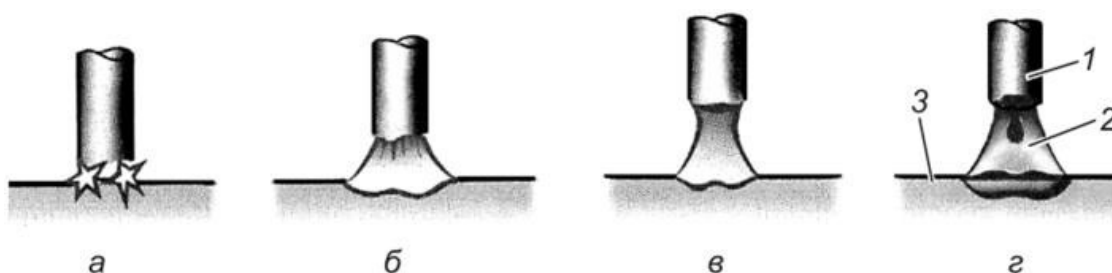


1 – катод; 2 – анод; 3 – катодное пятно; 4 – анодное пятно;

5 – столб сварочной дуги

Рисунок 1.8 – Схема ионизации газа

Таким образом, электропроводность воздушного промежутка между электродами, а отсюда и устойчивое горение дуги обеспечивается эмиссией катода и объемной ионизацией газов в зоне дуги, благодаря которым в дуге этих металлов обладают малым потенциалом ионизации. Возникновение сварочной дуги происходит в несколько этапов (рисунок 1.9).



а - короткое замыкание; *б* - образование прослойки из жидкого металла;
в - образование шейки; *г* - возникновение дуги: 1 - электрод; 2 - дуга; 3 -
 основной металл.

Рисунок 1.9 – Этапы возникновения дуги

Строение сварочной дуги показано на рисунке 1.10.

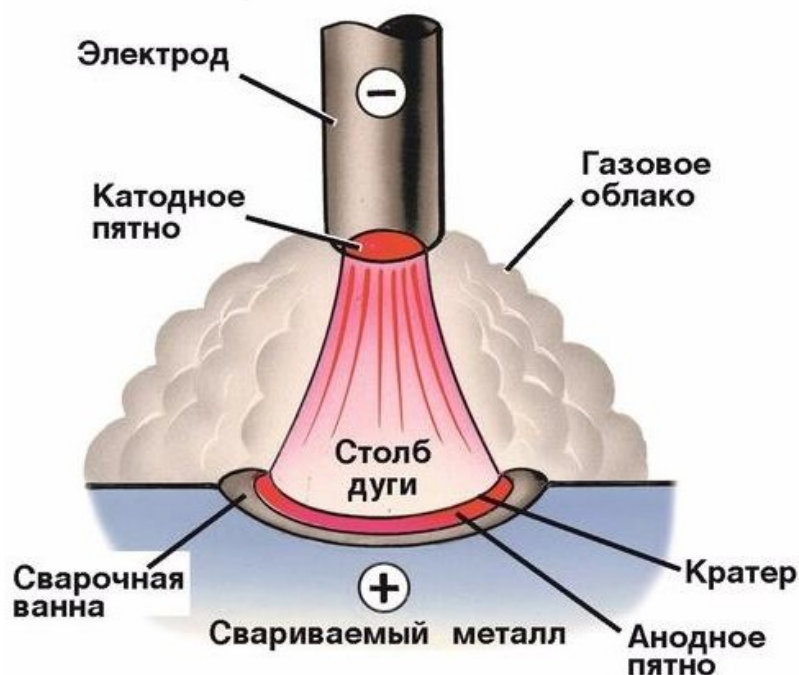


Рисунок 1.10 – Строение сварочной дуги

Введение этих элементов в обмазку электродов способствует большому образованию большого количества заряженных частиц, следовательно легче зажигать дугу.

Обмазка электродов способствует легкому зажиганию дуги и устойчивого ее горения.

За единицу энергии ионизации принят – электронвольт (эВ). Эта единица численно равна энергии, которую получает электрон, проходя через электрическое поле с разностью потенциалов в 1В.

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

В зависимости от количества энергии, приобретаемой электроном он может ионизироваться или возбуждаться.

Процесс ионизации характеризуется:

Потенциал возбуждения, U_v – это энергия необходимая электрону для перехода на орбиту с более высоким энергетическим уровнем.

Потенциал ионизации, U_i – это энергия необходимая электрону для срыва с внешней орбиты с целью образования положительного иона.

Работа выхода электронов, ϕ , – это энергия необходимая электрону при его срыве, для удаления его за пределы действия сил электростатического притяжения. Чем меньше работа выхода электронов, тем легче зажечь дугу, тем ровнее и спокойнее она горит.

Сродство к электрону, U_c . Это энергия, которая выделяется при присоединении электрона к атому или положительно заряженному иону. Чем выше сродство к электрону, тем лучше горит дуга.

Вывод: процесс горения дуги характеризуется:

- непрерывной ионизацией;
- эмиссией электронов.

Эмиссией электронов называется их срыв с раскаленной поверхности катода. Выделение электронов с поверхности катода достигается за счет:

-Термоэлектронной эмиссии – она заключается в способности раскаленной поверхности катода испускать электроны. Причем энергия, затраченная для срыва, равна работе выхода электронов. Сорвавшиеся с конца электрода электроны пополняются от источника питания.

Величина этой эмиссии зависит от плотности тока на электроде, следовательно и температуры нагрева.

-Автоэлектронная эмиссия – объясняется тем, что вокруг горящей электрической дуги имеется внешнее электрическое поле. Силы этого поля способствуют срыву электронов с конца электрода.

-Эмиссия электронов в результате ударов ионов по катоду возникает в тех случаях, когда положительные ионы под действием электрического поля устремляются к катоду и передают энергию, достаточную для выбивания электронов. Этот вид эмиссии играет значительную роль в создании мощного потока электронов в сварочной дуге, и благодаря выделению на катоде

потенциальной и кинетической энергии увеличивается скорость плавления электрода.

1.2.2 Виды ионизации в газах

Ионизация соударением заключается в том, что электроны, движущиеся с большой скоростью, встречаясь с нейтральными атомами газа, ударяясь о них, выбивают электроны, ионизируют газы. Такие соударения называются неупругими соударениями в отличие от упругих, вызывающих только повышение температуры газа. Количество энергии, которое необходимо затратить для отрыва электрон от ядра, называется работой ионизации – eU . Если работа ионизации eU измеряется в электронвольтах, а потенциал ионизации $U_{\text{и}}$ – в вольтах, то их численные значения равны.

По закону сохранения энергии работа ионизации будет превращаться в кинетическую энергию.

$$eU = mV^2/2 \quad (1.1)$$

где e – заряд электрона, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл;

U – разность потенциалов, В;

m – масса электрона ($9,1 \cdot 10^{-31}$);

V – скорость электрона, м/с.

Решим это уравнение относительно скорости:

$$V = \sqrt{2 eU / m} = 600 \sqrt{U}, \text{ км/с;} \quad (1.2)$$

Пользуясь этой формулой, можно подсчитать необходимую скорость для выполнения ионизации соударением.

Ионизация облучением – процесс образования заряженных частиц за счет поглощения газом световых квантов. Для ионизации облучением требуется, чтобы энергия световых квантов была равна или больше энергии, необходимой для ионизации газа. Видимый свет не может ионизировать газы.

Ультрафиолетовые лучи спектра вызывают ионизацию паров щелочных и щелочно-земельных металлов. Кванты рентгеновских и гамма-лучей способны ионизировать все без исключения газы.

Ионизация нагревом (термическая ионизация) протекает при высоких температурах за счет неупругих столкновений частиц газа, имеющих большую кинетическую энергию. Термическую ионизацию может вызывать столкновение нейтральных частиц, а также столкновение заряженных частиц с нейтральными.

Для осуществления термической ионизации всех частиц газа, заключенных в рассматриваемом объеме, требуется определенный нагрев, чтобы при сварке можно иметь место только тогда, когда столб дуги заполнен газом с низким потенциалом ионизации. Обычно в нагретом газе уравниваются процессы возникновения заряженных частиц и их исчезновение, и в объеме газа при данной температуре устанавливается постоянная степень ионизации.

Ионизация газовой среды характеризуется *степенью ионизации*, т. е. отношением числа заряженных частиц в данном объеме к первоначальному числу частиц (до начала ионизации).

При полной ионизации степень ионизации равна единице. На рисунке 1.11 представлен график зависимости степени ионизации от температуры нагрева некоторых веществ. Из графика видно, что при температуре 6000..8000⁰С такие вещества, как калий, натрий, кальций, обладают достаточно высокой степенью ионизации. Таким образом, электропроводность воздушного промежутка между электродами, а отсюда и устойчивое горение дуги обеспечивается эмиссией катода и объемной ионизацией газов в зоне дуги, благодаря которым в дуге этих металлов обладают малым потенциалом ионизации. Наряду с ионизацией имеет место рекомбинация. *Рекомбинацией* называется процесс образования нейтральных частиц из ионов разных знаков или из положительных ионов и электронов. По кривым, приведенным на рисунке 1.11 видно, что чем ниже потенциал ионизации вещества, тем больше степень его ионизации при данной температуре. Так, при температуре 6000 К степень ионизации паров калия составляет около 0,4, паров железа степень ионизации очень мала. Уменьшение степени ионизации приводит к уменьшению проводимости дугового промежутка.



Рисунок 1.11 – График зависимости степени ионизации от температуры нагрева для некоторых веществ

В реальных условиях сварки плавящимся электродом дуговой промежуток заполнен не одним газом, а смесью газов. Ионизация каждого из газов, входящих в смесь, будет протекать не так, как однородного газа, поэтому вводится понятие об эффективном потенциале ионизации $U_{и.эф.}$.

Под эффективным потенциалом ионизации газовой смеси подразумевается потенциал ионизации газа (условно однородного), который дал бы при заданной температуре ту же степень ионизации, что и смесь газов заданного состава.

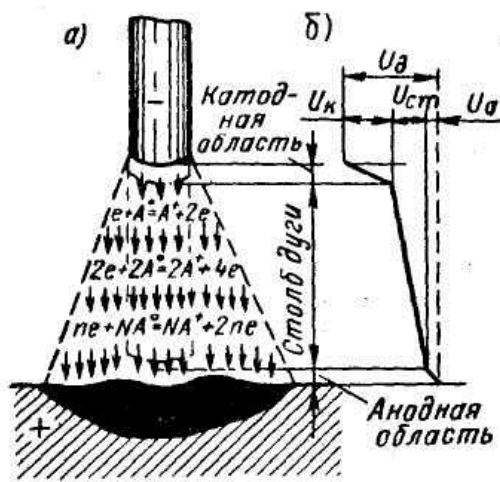
1.2.3 Процессы, протекающие в катодной, анодной зонах и столбе дуги и их характеристика

В сварочной дуге дуговой промежуток разделяется на три основные области: анодную, катодную и столб дуги (рисунок 1.12, а). В процессе горения дуги на электроде и основном металле имеются активные пятна, представляющие собой более нагретые участки электрода и основного металла, через которые проходит весь ток дуги. Активное пятно, находящееся на катоде, называется *катодным*, а пятно, находящееся на аноде, — *анодным*.

Катодная область — с нее слетают электроны, сталкиваются с атомами воздуха и дают положительный ион и два медленных электрона. Если считать,

что каждый электрон нейтрализует одну частицу, то число слетевших электронов равно числу положительных ионов. Но из-за большой массы ионов скорость их движения в катодной области будет меньше, чем электронов, и в каждый данный момент времени положительный заряд всех ионов будет больше отрицательного заряда электронов. Положительные ионы устремляются к катоду, скапливаясь, образуют объемный положительный заряд. В этой зоне резко возрастает напряженность электрического поля. На преодоление сопротивления этой зоны затрачивается часть напряжения. Это явление называется *прикатодным падением напряжения* – U_k (рисунок 1.12,б).

Анодная область. В зону к аноду устремляются отрицательные электроны, медленные и свободные электроны, положительные ионы отсутствуют, следовательно скапливается большое количество отрицательно заряженных частиц. Образуется объемный отрицательный заряд. Для преодоления сопротивления этого заряда затрачивается часть напряжения, которое называется *прианодным падением напряжения* – U_a (рисунок 1.12,б).



α – перенос зарядов; б-падение напряжение:

U_d – падение напряжение на дуге;

U_k – падение напряжение в катодной области;

$U_{ст}$ – падение напряжение в столбе дуги; U_a – падение напряжение в анодной области.

Рисунок 1.12 – Схема сварочной дуги

Столб дуги. В нем имеются отрицательные и положительные ионы и электроны. В любом сечении столба дуги имеем равное количество зарядов разных знаков, следовательно *столб дуги нейтрален*. На преодоление сопротивления в столбе дуги затрачивается часть напряжения – *падение напряжения в столбе дуги* – $U_{ст}$ (рисунок 1.12,б). Падение напряжения в дуге зависит от ее длины.

Общая длина сварочной дуги (рисунок 1.12) равна сумме длин всех трех областей:

$$\ell_d = \ell_k + \ell_c + \ell_a, \quad (1.3)$$

где ℓ_d — общая длина сварочной дуги, см;

ℓ_k — длина катодной области, равная примерно 10^{-5} см;

ℓ_c — длина столба дуги, см;

ℓ_a — длина анодной области, равная примерно $10^{-3} \div 10^{-4}$ см.

Общее напряжение сварочной дуги складывается из суммы падений напряжений в отдельных областях дуги:

$$U_d = U_k + U_a + U_c, \quad (1.4)$$

где U_d — общее падение напряжения на дуге, в;

U_k — падение напряжения в катодной области, в;

U_a — падение напряжения в анодной области, в

U_c — падение напряжения в столбе дуги, в;

$$U_d = a + b \cdot \ell_d, \quad (1.5)$$

где a — сумма падения напряжения в прикатодной и прианодной областях;

Падение напряжения в анодной области 2-3В; падение напряжения в катодной области 5-6 В.

b — падение напряжения на 1мм длины дуги (ℓ_d) и составляет 20 – 40 В.

По длине дуги бывают:

- короткая 2-4 мм;
- нормальная 4-6 мм;
- длинная свыше 6 мм.

Горящая дуга выделяет энергию в виде тепла и света. Все тепло, выделяемое дугой, дает полную тепловую мощность дуги. Если все тепло принять за 100%, то на частях дуги выделяется:

- на катоде – 36-38% тепла;
- на аноде – 42-43% тепла;
- на столбе дуги – 20-21% тепла.

Судить о дуге можно по ее температуре. Температура в столбе сварочной дуги колеблется и зависит от состава газовой среды дуги, материала, диаметра электрода и плотности тока. Температуру приближенно можно определить по формуле, предложенной академиком АН УССР К. К. Хреновым:

$$T_{ст} = 810 \cdot U_{эф}, \quad (1.6)$$

где $T_{ст}$ — температура столба дуги, °С;

$U_{эф}$ — эффективный потенциал ионизации.

Температура дуги распределяется:

- в катодной области – 3200°С;
- в анодной области – 3900°С;
- в столбе дуги – 6000-7000°С.

1.2.4 Влияние рода тока, полярности тока, состава газов на дугу

1.2.4.1 Влияние рода тока, полярности тока, состава газов на дугу

1) Влияние рода тока и полярности тока на дугу

При питании дуги от источников переменного тока электрические и тепловые процессы несколько отличаются от процессов, происходящих в дуге постоянного тока.

При переходе значения тока через нуль и перемене полярности в начале и в конце каждого полупериода дуга угасает, и температура активных пятен и

дугового промежутка снижается (рисунок 1.13). Это вызывает деионизацию газовой смеси и уменьшение электропроводности столба дуги. Особенно падает температура активного пятна, расположенного на поверхности сварочной ванны, в связи с интенсивным отводом теплоты в массу основного металла.

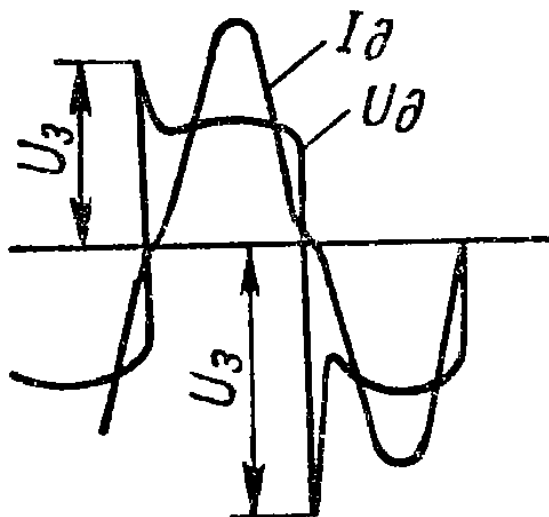
В следующий за угасанием дуги момент напряжение на дуговом промежутке меняет полярность, и создавшиеся в прошедшем полупериоде объемные разряды у катода и анода под действием электрического поля нового направления устремляются друг к другу и рекомбинируют, вызывает дополнительную деионизацию газов в столбе дуги.

Понижение температуры столба дуги, активных пятен и процессы рекомбинации резко снижают степень ионизации дугового промежутка, и повторное зажигание дуги в начале каждого полупериода обычно происходит только при повышенном напряжении между электродами, называемыми пиком зажигания, или напряжением повторного зажигания дуги, которое всегда выше напряжения дуги, соответствующего стационарному её горению. Установлено, что пик зажигания, несколько выше в тех случаях, когда катодное пятно находится на основном металле.

Наличие в дуге паров элементов с низким потенциалом ионизации, снижает эффективный потенциал ионизации газа в дуге, в результате чего в каждом полупериоде тока после угасания дуги электропроводность дуги сохраняется более продолжительное время (до более низких температур), пик зажигания становится меньше, дуга возбуждается легче и горит устойчивее. На этом основано применение стабилизирующих элементов, особенно при сварке на переменном токе.

Введение же в дуговой промежуток элементов, имеющих большое сродство к электрону, – F, Cl, O и образующих отрицательные ионы, приводит к рекомбинации, деионизации газов и повышения пика зажигания дуги.

Чем хуже условия для повторного возбуждения дуги, тем выше должен пик зажигания, тем выше должно быть напряжение холостого хода источника питания дуги.



I_d — ток в дуге; U_d — напряжение на дуге; U_3 — напряжение повторного зажигания дуги.

Рисунок 1.13 - Кривые изменения тока и напряжения дуги во времени при сварке переменным током

2) Влияние состава газов на условия горения дуги

Для защиты расплавленного металла сварочной ванны в зону сварки вводят газы. Различные газы, по разному влияют на условия зажигания и горения дуги переменного тока.

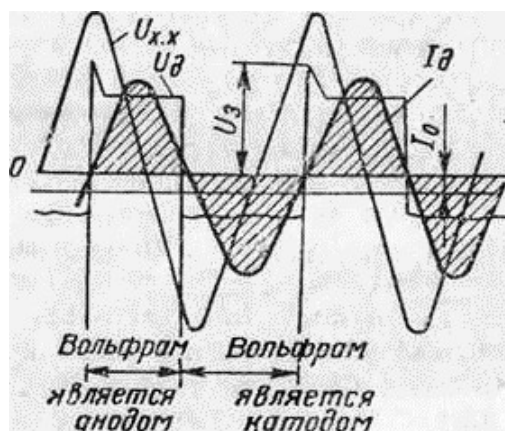
Введение газа приводит к охлаждению катода и столба дуги, что является причиной относительно ускоренного прекращения эмиссии электронов с катода и падения проводимости межэлектродного промежутка после угасания дуги, вследствие чего повторное зажигание дуги в каждом полупериоде тока еще больше затрудняется. Но различные газы по-разному влияют на условия зажигания и горения дуги переменного тока. Рассмотрим влияние некоторых из них.

Инертные газы. Аргон, а особенно гелий, имеют высокий потенциал возбуждения и потенциал ионизации, поэтому зажигание дуги затруднено. Но,

возникнув, дуга горит устойчиво вследствие того, что отсутствуют потери энергии на диссоциацию, имеющую место при многоатомных газах. Кроме того, атомы инертных газов имеют целиком заполненные электронами внешние орбиты, хорошо защищающие приближающийся к атому лишний электрон от

действия положительного заряда ядра, что исключает образование отрицательных ионов и снижает коэффициент рекомбинации, повышая устойчивость дуги.

При горении дуги между электродами с разными теплофизическими свойствами, например между вольфрамом и алюминием, в те полупериоды, когда катодом является вольфрам, дуговой разряд проходит в основном за счет термоэлектронной эмиссии. Благодаря высокой температуре кипения и относительно низкой теплопроводности вольфрама напряжение зажигания невелико, и дуга горит при меньшем напряжении (рисунок 1.14). В те полупериоды, когда катодом является алюминий (обратная полярность), напряжение зажигания дуги относительно не велико. Зажигание дуги в обоих случаях происходит с некоторым опозданием, и кривая напряжения дуги имеет несимметричную форму; в ней имеется постоянная составляющая, которая вызывает появление в сварочной цепи постоянной составляющей тока, значение которой тем больше, чем больше разница в теплофизических свойствах материала электрода и изделия



$U_{хх}$ – напряжение холостого хода источника тока;

$U_{д}$ – напряжение на дуге; $U_{з}$ – напряжение повторного зажигания дуги;

$I_{д}$ – ток на дуге.

Рисунок 1.14 – Изменение кривых тока и напряжения при горении дуги переменного тока между электродами с различными теплофизическими свойствами.

Если при указанных условиях сварки в цепь дуги включить амперметр постоянного тока, то отклонение стрелки его будет пропорционально составляющей постоянного тока.

Постоянная составляющая сварочного тока создает постоянное магнитное поле в сердечнике трансформатора и дросселя. Это ухудшает устойчивость дуги и отрицательно сказывается на технологических свойствах ее. Тогда даже незначительное содержание O_2 и N_2 в аргоне приводит к образованию тугоплавкой пленки окислов и нитридов на поверхности алюминиевого сплава в месте сварки, препятствующей сплавлению кромок и формированию шва.

Для полного или частичного устранения составляющей постоянного тока в сварочную цепь последовательно включают следующие элементы: конденсаторы, активное и индуктивное сопротивление и другие устройства.

Сварочная дуга, горящая между вольфрамовым электродом и изделием в инертных газах, обладает способностью к катодному распылению, заключающемуся в том, что под действием положительных ионов, бомбардирующих катод (изделие), с поверхности сварочной ванны и соседних относительно холодных зон происходит вырывание (испарение) частиц металла. Вместе с ними удаляются окисные пленки, даже такие тугоплавкие как Al_2O_3 , что улучшает условия сварки.

В среде аргона наблюдается более интенсивное катодное распыление, чем в среде гелия.

Углекислый газ. Под действием теплоты сварочной дуги углекислый газ CO_2 диссоциирует на окись углерода и атомарный кислород, и атмосфера дуги насыщается кислородом, имеющим большой потенциал ионизации и большое сродство к электрону. Вследствие большого сродства к электрону атомы кислорода захватывают электроны, образуя отрицательные ионы, которые, соединяясь с положительными ионами, рекомбинируют.

Захват электронов атомами кислорода и нейтрализация положительных ионов приводят к уменьшению общего количества заряженных частиц в дуговой промежутке, а уменьшение количества положительных ионов уменьшает

положительный объемный заряд у катода, и электроны не получают должного ускорения в катодной области.

Электроны, обладающие меньшей кинетической энергией, легче захватываются атомами кислорода и положительными ионами, и в результате степень ионизации резко падает. При питании дуги переменным током это еще усугубляется и тем, что часть отрицательных ионов, накапливаясь у анода, увеличивает объемно-отрицательный заряд у анода, и в момент смены полярности, когда объемные заряды у катода и анода устремляются друг к другу, рекомбинируют. В связи с этим деионизация газов в столбе дуги, в котором находятся атомы кислорода, будет больше, чем в дуге переменного тока, в которой отсутствуют элементы, имеющие большое сродство к электрону. Поэтому переменный ток для сварки в углекислом гаде почти не применяется, а применяется постоянный ток преимущественно обратной полярности.

1.2.4.2 Статическая вольт-амперная характеристика дуги и её влияние на условия горения дуги

Статическая вольт-амперная характеристика отражает зависимость между установившимися значениями тока и напряжением дуги при постоянной ее длине. График делится на три области (рисунок 1.15):

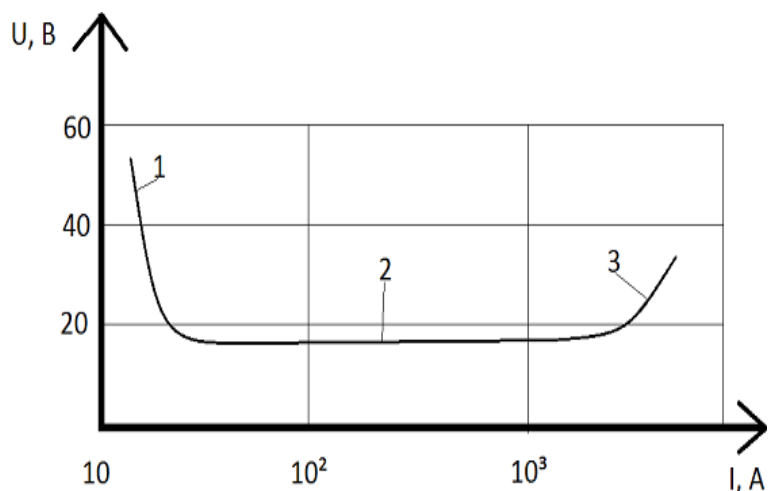
- падающая – при подъеме силы тока напряжение резко спадает, это связано с формированием столба: площадь сечения плазменного потока возрастает, электропроводность плазмы изменяется;

- жесткая, это участок стабильной плотности тока и падения напряжения, с ростом величины тока от 100 до 1000 А пропорционально увеличивается диаметр дугового столба (анодное и катодное пятна, соответственно, изменяются);

- возрастающая, характеризуется постоянным размером катодного пятна, она ограничена диаметром электрода, при увеличении величины тока по закону Ома увеличивается напряжение, сопротивление дугового столба.

Вольт-амперная характеристика процесса обычной ручной сварки с использованием плавящихся и неплавящихся электродов на воздухе или в облаке

защитного газа ограничена двумя первыми областями. Механизированной сварке с использованием флюсов соответствует график второй и третьей областей, сварка плавящимся электродом в облаке защитной атмосферы – первая область.



1 — падающая; 2 — жесткая; 3 — возрастающая.

Рисунок 1.15 - Статическая вольт-амперная характеристика сварочной дуги

1.2.4.3 Влияние электромагнитных сил на сварочную дугу. Понятие магнитного дутья. Меры для снижения влияния магнитного дутья

1) *Влияние собственного магнитного поля.* Под собственным магнитным полем следует понимать круговое магнитное поле тока, возникающее при прохождении тока по сварочной цепи, в том числе и по сварочному металлу. В этом случае, если токоподвод подключен к свариваемому изделию вблизи дуги, магнитное поле оказывает равномерное симметричное воздействие на столб дуги, и дуга не отклоняется (рисунок 1.16, а).

Если же токоподвод подключен вдали от места горения дуги, то за счет сгущения магнитного поля со стороны токоподвода дуга отклоняется в противоположную сторону (рисунок 1.16, б).

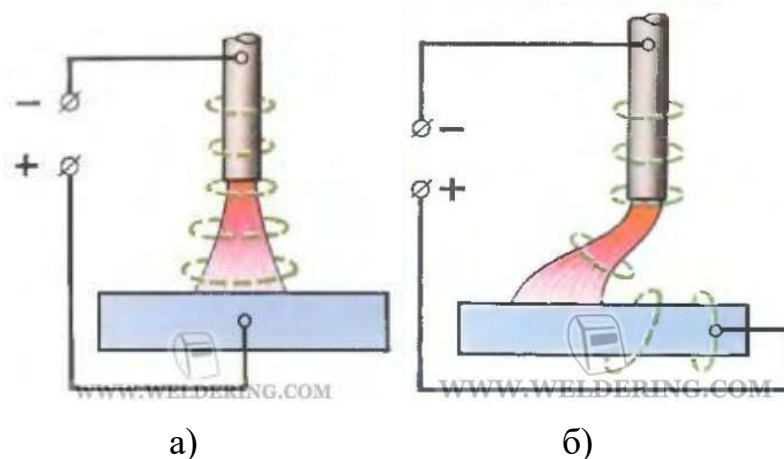


Рисунок 1.16 – Действие собственных магнитных полей на дугу

2) Влияние постороннего магнитного поля.

а) Подковообразным магнитом можно создать поперечное магнитное поле.

Оно будет взаимодействовать с кольцевым магнитным полем, возникающим вокруг дуги при прохождении тока (рисунок 1.17). В результате такого взаимодействия увеличивается напряженность поля с той стороны дуги, где направление силовых линий совпадает, а со стороны, где силовые линии встречаются, напряженность поля уменьшается. Появляется результирующая электромагнитная сила F , отклоняющая дугу в сторону.

На направление отклонения дуги влияет полярность подключения и направления постороннего магнитного поля.

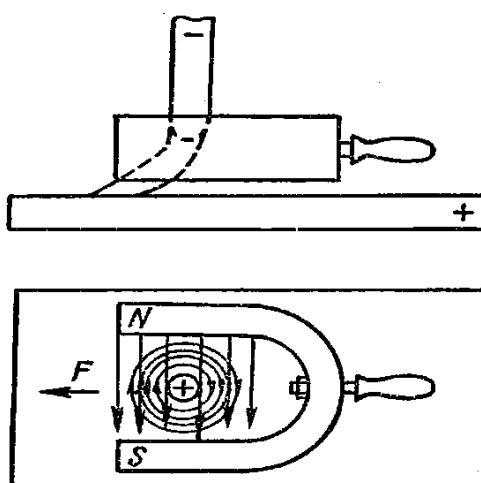


Рисунок 1.17 – Действие поперечного магнитного поля на сварочную дугу

б) Продольное магнитное поле направлено по оси сварочной дуги и совпадает с направлением электрического поля дуги.

Оно может быть получено при размещении дуги в соленоиде (рисунок 1.18,а). Такое магнитное поле не оказывает никакого действия на заряженные частицы, движущиеся в направлении электрического поля, но на заряженные частицы, поперек этого поля, оно оказывает заметное действие.

Направление действия сил будет зависеть от направления магнитного поля соленоида, но не от рода и полярности тока. В результате частицы столба дуги будут вращаться по окружности вокруг оси дуги (рисунок 1.18,б).

Совместное действие продольного и электрического полей заставляет заряженную частицу двигаться по спирали (рисунок 1.18,в).

в) *Действие ферромагнитных масс* на отклонение дуги обусловлено тем, что магнитная проницаемость ферромагнитных материалов в тысячи раз больше магнитной проницаемости воздуха, а известно, что магнитные силовые линии стремятся пройти по среде с наименьшим магнитным сопротивлением.

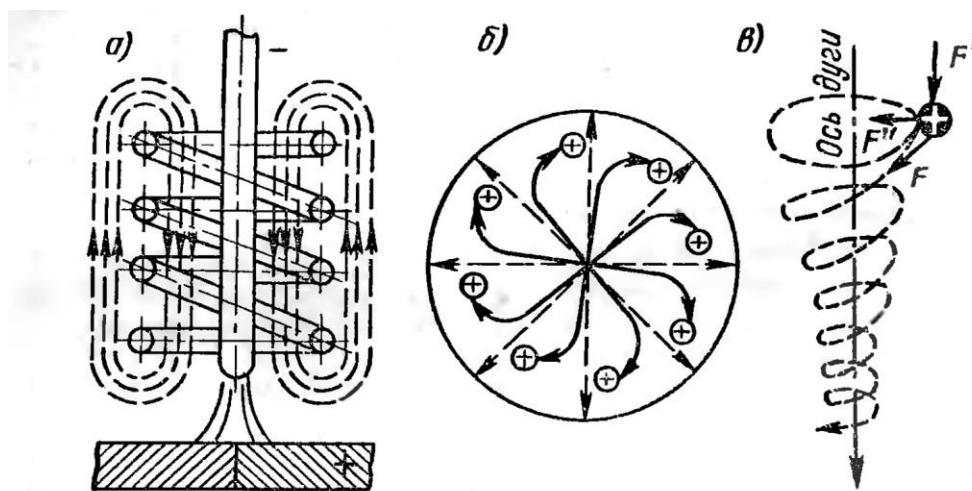


Рисунок 1.18 - Действие продольного магнитного поля на сварочную дугу

Поэтому, если возле дуги находится ферромагнитное тело, concentрическое магнитное поле исказится вследствие того, что силовые линии, расположенные вблизи ферромагнитного тела, легко пронизывают его, создавая разрежение в этой части поля, а другая часть силовых линий, расположенных с противоположной стороны дуги, вместе с первой частью будет подтянута к ферромагнитному телу, и на этой стороне дуги силовые линии магнитного поля

сгустятся. Дуга, как гибкий проводник окажется прижатой к ферромагнитному телу (рисунок 1.19).

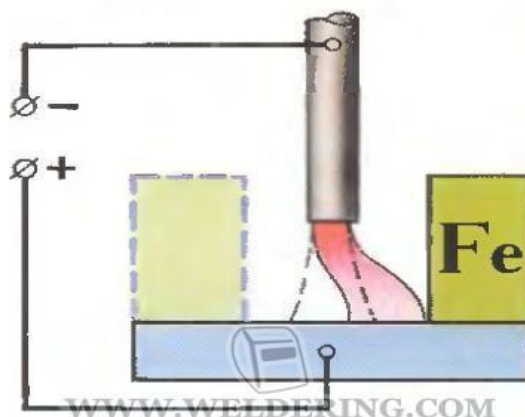


Рисунок 1.19 – Влияние ферромагнитных масс на отклонение сварочной дуги

3) Меры для снижения влияния магнитного дутья

Для снижения негативного воздействия эффекта магнитного дутья применяют следующие меры борьбы с ним:

- выполнять сварку возможно короткой дугой;
- вести сварку переменным напряжением (если это допустимо по техническим условиям);
- массовый провод присоединяют по возможности ближе к месту сварных работ;
- применять скользящие контакты;
- тщательно заземляют заготовки;
- место работ ограждают антимагнитными металлическими экранами. Это помогает снизить влияние ферромагнитных масс и излучаемых их полей;
- угол наклона сварочного электрода выполнять в сторону противоположную магнитному дутью;
- применять ферромагнитные массы (петля кабеля).

1.2.4.4 Виды переноса электродного металла на изделие.

Одной из главных характеристик, которые имеет перенос металла при сварке, является перенос металла на изделие с электрода. Этот процесс является одной из самых главных характеристик, которые определяют технологические характеристики сварки, при использовании плавящего электрода. Перенос металла в основном происходит в виде капель различного размера, а также паров.

Обычно различают четыре вида переноса электродного металла: короткими замыканиями, крупнокапельный, мелкокапельный и струйный. Для каждого способа сварки обычно характерен свой вид переноса. При ручной сварке из-за малой плотности тока в электроде происходит перенос короткими замыканиями, когда капля расплавленного металла на очень короткий промежуток времени (миллисекунды) полностью перекрывает дуговой промежуток. Этот вид переноса возможен и при сварке в CO_2 на малых токах. При увеличении силы тока электромагнитные силы возрастают и капля открывается раньше, чем касается сварочной ванны. Происходит переход к крупнокапельному переносу, который сопровождается повышенным разбрызгиванием электродного металла. При дальнейшем увеличении силы тока размер капли уменьшается и перенос становится мелкокапельным. В ряде случаев возможно достижение струйного переноса, когда отдельные очень мелкие капли сливаются в общую струю электродного металла. При этом дуга охватывает боковую поверхность электрода, хорошо его разогревает, вследствие чего он заостряется.

Наиболее предпочтительными с точки зрения минимального разбрызгивания и хорошего формирования шва являются мелкокапельный и струйный переносы, которые характерны для сварки под слоем флюса. Они достигаются и при сварке в среде аргона при высоких плотностях тока. При сварке в CO_2 при токах около 200 А перенос крупнокапельный. Вследствие диссоциации углекислого газа и его высокой теплопроводности происходит интенсивное охлаждение столба дуги. Дуга сжимается и анодное пятно разогревает только центральную часть капли, не захватывая боковые поверхности проволоки, поэтому капля вырастает до больших размеров.

1.2.4.5 Силы, действующие на каплю при ее переносе на изделие

Сварочный электрод или проволока под действием тепла, выделяющегося в дуге, расплавляются. При этом образуются капли расплавленного металла, которые переносятся от электрода к свариваемому изделию. Характер процесса отрыва каплей от электрода и их переноса к изделию зависит от ряда факторов электромагнитных сил, действующих в дуге; сил тяжести; сил поверхностного

натяжения жидкого металла; градиента напряженности электрического поля; давления образующихся газов внутри капли.

Электромагнитные силы возникают вследствие появления магнитного поля вокруг проводника, по которому протекает электрический ток. Они оказывают сжимающее действие на проводник, в том числе на каплю металла, образующуюся на торце электрода. Магнитное поле способствует образованию «шейки» и тем самым облегчает отрыв капли от электрода и переход ее на свариваемое изделие.

Сила тяжести заставляет каплю перемещаться по вертикали сверху вниз, она способствует переносу капли через дугу при сварке в нижнем положении, но противодействует переносу капли при потолочном положении.

Сила поверхностного натяжения, обусловленная действием межмолекулярного притяжения, стремится придать расплавленному металлу на конце электрода сферическую форму и способствует слиянию капли с жидким металлом ванны. Сила поверхностного натяжения связана прямой зависимостью с размером капли: чем она больше, тем больше размер капли. Введением в атмосферу дуги элементов, снижающих поверхностное натяжение металла (например, кислорода), можно уменьшить размер капель. Сила поверхностного натяжения способствует также удержанию жидкого металла ванны от вытекания при сварке в потолочном и вертикальном положениях.

Неравномерность напряженности электрического поля возникает вследствие того, что плотность тока в электроде значительно выше плотности тока в изделии, в связи с чем напряженность электрического поля зоны электрода больше напряженности электрического поля зоны сварочной ванны. Поэтому создается продольная сила, которая направлена от высокой напряженности к

низкой, т.е. от электрода к сварочной ванне. Эта сила способствует переносу капли от электрода к изделию.

Сила внутреннего давления газов возникает в результате протекания металлургических процессов в расплавленном металле «шейки» капли, сопровождающихся образованием газообразного оксида углерода, объем которого во много раз превышает объем расплавленного металла. Вследствие этого мгновенно выделяющийся из металла газ способствует отрыву, дроблению и переходу капли на изделие.

Сила реактивного действия газов, образующихся в чехольчике при сварке толстопокрытыми электродами. Сила возникает вследствие того, что покрытие в первую очередь расплавляется и частично испаряется внутри чехольчика и там образуется большое количество газов, значительно увеличивающееся в объеме вследствие интенсивного нагрева. Это и приводит к появлению реактивной силы газов, отбрасывающих капли от электрода к изделию.

1.2.5 Электрическая, тепловая и эффективная тепловая мощности. КПД дуги

Дуга является мощным сконцентрированным источником теплоты. Горящая дуга характеризуется величиной тока и напряжения, поэтому электрическая мощность дуги (Вт) равна:

$$P = I_d \cdot U_d ; \quad (1.7)$$

Электрическая мощность превращается в тепловую и даёт полную тепловую мощность:

$$Q_{\text{пол}} = I_d \cdot U_d \cdot K; \quad (1.8)$$

где K – коэффициент, учитывающий влияние оказываемое не синусоидальностью кривых тока и напряжения на мощность дуги.

При: постоянном токе $K = 1$; при переменном токе $K = 0,7 - 0,97$.

Рассматривая тепловой баланс, видим, что не всё тепло, выделяемое дугой, используется на расплавление свариваемого и электродного металла. Часть идет на потери (теплопроводность, уходит с брызгами, угар, испарение). Следовательно, введено понятие *эффективной тепловой мощности* – это количество теплоты, введенное источником нагрева в изделие за единицу времени.

$$Q_{\text{эф}} = I_{\text{д}} \cdot U_{\text{д}} \cdot K \cdot \eta = Q_{\text{пол}} \cdot \eta \quad (1.9)$$

где η – эффективный коэффициент полезного действия (КПД) нагрева изделия сварочной дугой.

$$\eta = Q_{\text{эф}} / Q_{\text{пол}} \quad \%; \quad (1.10)$$

$$Q_{\text{эф}} < Q_{\text{пол}} < 100\%; \quad (1.11)$$

Эффективный КПД зависит от способа сварки:

- сварка тонкообмазанными электродами $\eta = 0,5 - 0,65$;
- сварка неплавящимся электродом в защитных газах $\eta = 0,55 - 0,63$;
- сварка толстообмазанными электродами $\eta = 0,6 - 0,65$;
- под флюсом $\eta = 0,8 - 0,95$;
- электрошлаковая сварка $\eta = 0,7 - 0,85$;
- сварка в защитном газе плавящимся электродом $\eta = 0,7 - 0,8$.

Эффективная тепловая мощность зависит от состава обмазки, флюса, вида соединения, положения шва в пространстве и других факторов.

Нагрев электрода и электродной проволоки дугой при дуговой сварке выполняется за счёт энергии, выделяемой дугой в активном пятне, расположенном на его торце и теплоты Джоуля – Ленца, выделяемой при прохождении тока по вылету электрода. *Вылет электрода* – это участок электрода от места контакта с токоподводящим устройством до его конца.

При ручной дуговой сварке – вначале вылет составляет 200 – 400 мм; в конце – 30 – 40 мм.

При полуавтоматической и автоматической сварке, в зависимости от диаметра и теплофизических свойств проволоки вылет изменяется от 12 до 70 мм и мало меняется в процессе сварки.

Количество теплоты (Дж), выделяемое по закону Джоуля – Ленца равно:

$$Q_{эл} = I^2 \cdot \rho_t \cdot \ell / F \cdot t; \quad (1.12)$$

где ℓ - длина вылета электрода, м;

F – площадь сечения электрода, м^2 ;

t - время горения дуги, с;

ρ_t - удельное сопротивление материала электрода нагретого до температуры – T , $\text{Ом}\cdot\text{м}$;

При ручной дуговой сварке штучный электрод включён в сварочную цепь и при горении дуги он разогревается , количество тепла на электроде повышается, тогда ρ_t – удельное сопротивление материала электрода равно, $\text{Ом}\cdot\text{м}$;

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha T); \quad (1.13)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление материала электрода , $\text{Ом}\cdot\text{м}$;

α – температурный коэффициент, $\alpha = 0,004$;

При разогреве электрода в силу вступает коэффициент теплового расширения обмазки и стержня. При перегреве электрода обмазка откалывается, поэтому при ручной дуговой сварке величина тока ограничена и составляет не более 250 – 300 А.

Считается нормальным, если к концу сварки электрод (огарок) разогревается до 600°C .

Температура нагрева электрода, $^\circ\text{C}$;

$$T = m \cdot j \cdot d_{\text{эл}} + T_{\text{окр ср.}}; \quad (1.14)$$

где m – постоянная величина, определяется опытным путём и зависит от марки электрода, рода тока и полярности, $(1,0 - 0,2)$;

j – плотность тока на электроде, А/мм^2 ;

$d_{\text{эл}}$ – диаметр электрода, мм;

$T_{\text{окр ср.}}$ – температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$.

При механизированных способах сварки, благодаря малому вылету электрода голой проволоке, можно применять большую плотность тока.

1.2.6 Основные показатели процесса сварки: коэффициенты расплавления, наплавки, потерь. Погонная энергия

1.2.6.1 Коэффициенты плавления, наплавки и потерь

О производительности сварки можно судить:

1) по количеству расплавленного электродного материала:

$$G_p = \alpha_p \cdot I_{\text{св}} \cdot t_0; \quad (1.15)$$

2) по количеству наплавленного материала:

$$G_n = \alpha_n \cdot I_{\text{св}} \cdot t_0; \quad (1.16)$$

где G_p , G_n – вес расплавленного и наплавленного металла.

α_p – коэффициент расплавления – это количество расплавленного металла в течении 1ч при силе тока в 1 А.

α_n – коэффициент наплавки – это количество наплавленного металла в течении 1ч при силе тока в 1 А.

t_0 - время горения дуги.

Не весь расплавленный металл попадает в шов. Часть его идет на разбрызгивание, угар, испарение. Следовательно количество расплавленного

металла всегда больше, чем наплавленного, отсюда α_p больше α_n на 1 – 3 г/Ач.

α_p и α_n - характеризуют производительность сварки и зависят от:

- способа сварки,
- марки электродного материала,
- плотности тока на электроде,
- напряжения на дуге,
- атмосферы дуги.

Из формул (1.15), (1.16) можно записать:

$$\alpha_p = G_p / I_{св} t_0; \quad (1.17)$$

$$\alpha_n = G_n / I_{св} t_0; \quad (1.18)$$

Так как имеются потери, то коэффициент потерь равен:

$$\Psi = (G_p - G_n) / G_p \cdot 100\%. \quad (1.19)$$

$$\Psi = (\alpha_p - \alpha_n) / \alpha_p \cdot 100\%. \quad (1.20)$$

1.2.6.2 Понятие о погонной энергии

Производительность сварки зависит от основных параметров режима сварки: прямо пропорционально силе тока и напряжению на дуге и обратно пропорционально скорости сварки. Учитывая эти режимы, ввели понятие погонной энергии (q_n) – это количество тепла вводимого в единицу длины шва, (Дж/см).

$$q_n = I_d \cdot U_d \cdot \eta / V_{св}; \quad (1.21)$$

Расчёт погонной энергии можно производить по сечению шва (F_n).

$$q_n = 650 \cdot F_n; \quad (1.22)$$

Задача: определить погонную энергию, если известно, что сечение валика шва равно 60 мм^2 .

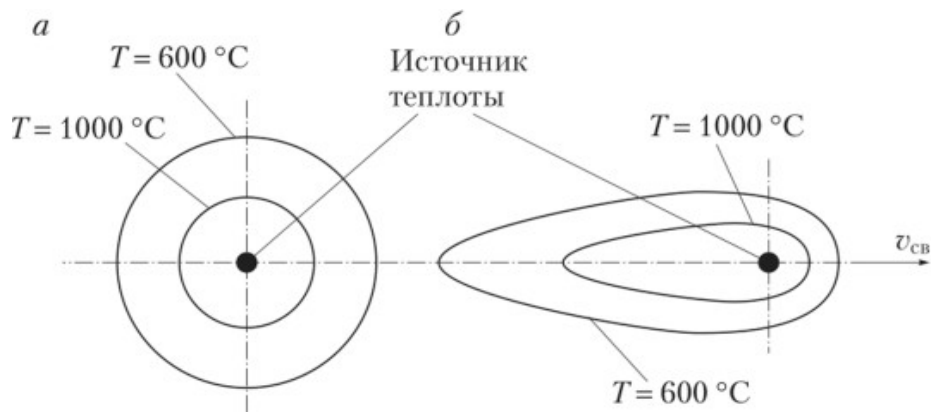
$$q_n = 650 \cdot 60 = 39\,000 \text{ Дж/см.}$$

1.2.7 Нагрев тела неподвижным и подвижным источником теплоты. Расчет длины и времени существования сварочной ванны при дуговой сварке

Количество тепла, выделяемое сварочным источником в единицу времени, называется его полной тепловой мощностью. Это тепло расходуется на нагрев свариваемого металла, а также частично теряется. Потери обусловлены теплообменом с окружающей средой, нагревом покрытия электрода, уносом тепла с нагретым защитным газом, нагревом узлов сварочной горелки, нагревом флюса, отражением тепла свариваемым изделием, разбрызгиванием металла и т.д. Потери обычно учитываются коэффициентом полезного действия источника нагрева

Распределение температур на поверхности металла при его нагреве неподвижным точечным источником тепла приведено на рисунке 1.20, а, изотермы представляют собой окружности с центром в месте расположения источника. При перемещении источника нагрева линии изотерм вытягиваются вдоль оси движения, сгущаясь перед источником (рисунок 1.20, б).

Распределение температур в металле при сварке может быть рассчитано теоретически. Тепловые расчеты используются для определения глубины проплавления и размеров шва, скорости охлаждения металла, деформаций и напряжений при сварке.



а — для неподвижного источника тепла; б — для подвижного источника тепла

Рисунок 1.20 – Изотермы 600 и 1000 °С

В общем виде они достаточно сложны, поэтому в зависимости от требуемой точности пользуются различными упрощениями. Наиболее простой схемой является расчет тепла в полубесконечном теле, которое имеет одну верхнюю поверхность и не ограничено в стороны по осям x и y , а также в толщину по оси z .

В случае воздействия на поверхность полубесконечного тела движущегося источника тепла температура T любой точки может быть определена по формуле

$$T = \frac{Q}{2\pi\lambda R} e^{-\frac{v_{\text{св}}}{2a}(X+R)}, \quad (1.23)$$

где λ — коэффициент теплопроводности свариваемого металла, Вт(см·°C);

X — проекция рассматриваемой точки на ось OX , см;

R — расстояние от точки до источника тепла, см;

$V_{\text{св}}$ — скорость сварки, м/ч;

α — коэффициент температуропроводности, см²/с.

Если источник тепла неподвижный, $V_{\text{св}} = 0$ и формула (1.23) принимает вид.

$$T = \frac{Q}{2\pi\lambda R}. \quad (1.24)$$

Распределение температур в полубесконечном теле в различных плоскостях, рассчитанное по формуле (1.23), приведено на рисунке 1.21.

Представляет интерес анализ температур по оси x впереди и позади источника тепла. На оси x проекция рассматриваемой точки на ось (X в формуле (1.23)) равна расстоянию от источника до рассматриваемой точки: впереди источника $X = R$, за источником $X = -R$. Подставив эти значения в формулу (1.23), получим:

- за источником

$$T = \frac{Q}{2\pi\lambda R} e^{-\frac{v_{св}}{2a}(-R+R)} = \frac{Q}{2\pi\lambda R}. \quad (1.25)$$

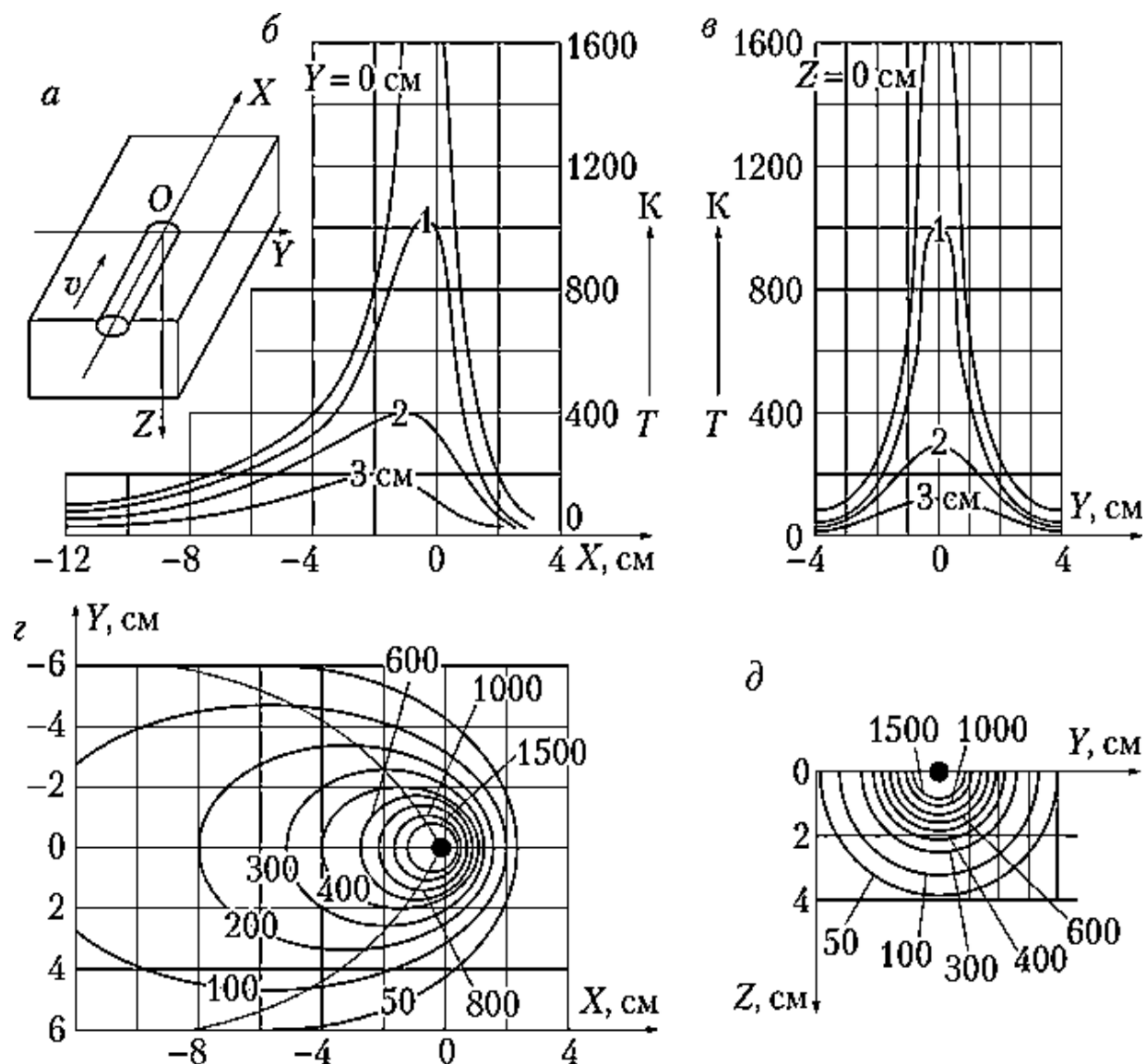
В результате получим такое же уравнение, как для неподвижного источника. Следовательно, распределение температур за источником не зависит от скорости его перемещения;

- впереди источника

$$T = \frac{Q}{2\pi\lambda R} e^{-\frac{v_{св}}{2a}(R+R)} = \frac{Q}{2\pi\lambda R} e^{-\frac{v_{св}R}{a}}. \quad (1.26)$$

Из полученного выражения следует, что чем быстрее движется источник, тем меньше теплоты распространяется перед ним. При очень быстром перемещении источника нагрева его скорость может превысить скорость распространения тепла, что приведет к непроварам кромок. Кроме того, с увеличением скорости перемещения источника тепла области, нагреваемые выше определенной температуры (ограниченные изотермой), уменьшаются по площади, а изотермы суживаются в направлении, перпендикулярном оси шва, и сгущаются впереди источника.

С увеличением мощности источника тепла Q (например, дуги) области, нагретые выше определенной температуры, увеличиваются, причем увеличение мощности оказывает более сильное влияние, чем уменьшение скорости.



α — схема расположения координатных осей; б — температуры вдоль оси X на различном удалении от нее (значения Y указаны на кривых); в — температуры вдоль оси Y на различной глубине Z ; г — изотермы на поверхности полубесконечного тела; д — изотермы по поперечному сечению тела.

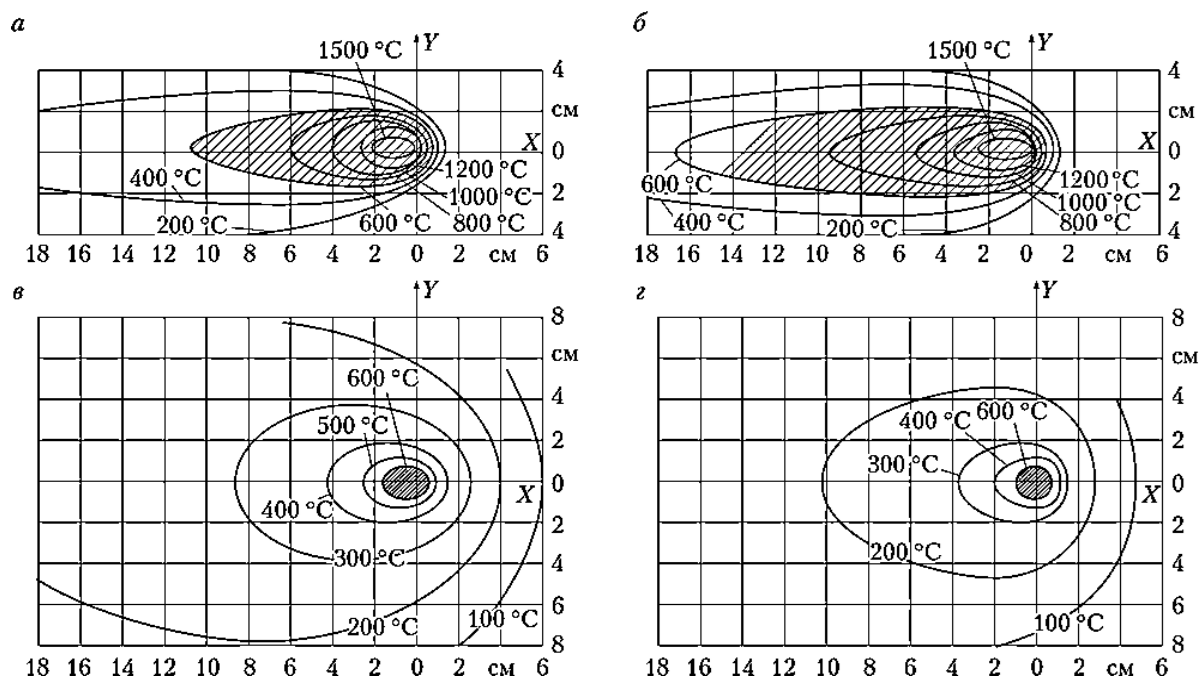
Рисунок 1.21 – Распределение температур в различных плоскостях при движении точечного источника по поверхности полубесконечного тела

Влияние теплофизических свойств на размеры и форму изотерм показано на рисунке 1.22 на примере распределения температур под действием подвижного источника в различных материалах.

Изотермы одинаковых температур (например, $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$) для нержавеющей хромоникелевой стали более удалены от центра, чем для низкоуглеродистой стали. Это объясняется более низкой теплопроводностью нержавеющей стали. Для меди и алюминия, наоборот, области изотерм укорачиваются и приближаются к окружностям, что связано с высокой теплопроводностью этих материалов.

Отсюда следует, что для получения определенной зоны расплавления нержавеющей стали в сравнении с низкоуглеродистой можно использовать источник меньшей мощности. Для меди и алюминия источник нагрева должен быть более мощный.

На основании тепловых расчетов могут быть определены размеры сварочной ванны, так как она ограничена изотермой температуры плавления металла



а — низкоуглеродистая сталь; б — нержавеющая хромоникелевая сталь;
в — алюминий; г — медь (заштрихованная область — $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Рисунок 1.22 – Влияние теплофизических свойств материала на характер температурного поля в пластине

Наиболее простой расчет можно провести, когда сварочная ванна располагается за источником тепла (рисунок 1.23). В этом случае $R = l_B$ для каждого способа сварки:

$$T_{пл} = \frac{Q_{эф}}{2\pi\lambda l_B}; \quad l_B = \frac{\eta}{2\pi\lambda T_{пл}} I_{св} U_{д}. \quad (1.27)$$

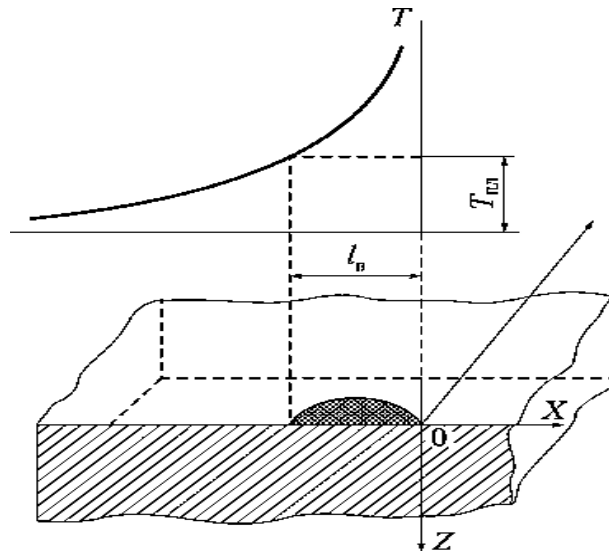


Рисунок 1.23 – Схема сварочной ванны при наплавке валика на полубесконечное тело быстро движущимся источником тепла

Расчеты показывают, что для всех способов сварки длина сварочной ванны определяется по формуле 1.28, т.е. прямо пропорциональна силе тока и напряжению на дуге.

$$l_B = (2.3 \dots 3) \cdot 10^{-3} I_{св} U_{д} \quad (1.28)$$

Время пребывания металла в жидком состоянии по оси шва связано с длиной ванны и скоростью перемещения дуги.

$$t_B = l_B / V; \quad (1.29)$$

где l_b – длина сварочной ванны, мм;

V – скорость перемещения дуги, мм/с.

Чем длиннее ванна, тем при прочих равных условиях дольше находится металл в расплавленном состоянии. Это в определенной мере влияет на качество выполненного шва.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Основные сведения об электрической дуге. Понятие электрического разряда. Виды разрядов.
- 2) Ионизация, её характеристика и виды.
- 3) Процессы на ее отдельных участках сварочной дуги.
- 4) Статическая вольтамперная характеристика и её влияние на условия горения дуги.
- 5) Виды переноса электродного металла на изделие (капельный и струйный). Силы, действующие на каплю при ее переносе на изделие.
- 6) Электрическая, тепловая и эффективная тепловая мощность процесса сварки.
- 7) Коэффициенты плавления, наплавки и потерь. Погонная энергия.
- 8) Расчет длины и времени существования сварочной ванны при дуговой сварке.

Литература: [1, глава1], [4, глава1, глава 4]

1.3 Изготовление и применение сварочных материалов

1.3.1 Сварочная проволока: область применения, классификация, требования к ней

1.3.1.1 Стальная сварочная проволока

1) Классификация и обозначение

Сварочная проволока служит для изготовления штучных электродов и для автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом и в защитных газах и для наплавки.

При сварке сталей в основном используют стальную холоднотянутую сварочную проволоку, поставляемую по ГОСТ 2246-70, который предусматривает изготовление проволоки 75 марок.

В зависимости от уровня легирования сварочная проволока подразделяется на низкоуглеродистую, легированную и высоколегированную.

Низкоуглеродистую проволоку изготавливают шести марок: Св-08, Св-08А, Св-08АА, Св-08ГА, Св-10ГА и Св-10Г2.

Легированную проволоку изготавливают тридцати марок: Св-08ГС, Св-12ГС, Св-08Г2С, Св-10ГН, Св-15ГСТЮЦА (ЭП-439), Св-08ГСМТ, Св-20ГСТЮА, Св-18ХГС, Св-10НМА, Св-08МХ, Св-08ХМ, Св-18ХМА, Св-08ХНМ, Св-08ХМФА, Св-0ХМФТ, Св-08ХГ2С, Св-08ХГСМА, Св-10ХГ2СМА...

Высоколегированную проволоку изготавливают 39 марок:

Св-12Х11НМФ, Св-10Х11НВМФ, Св-12Х13, Св-20Х13, Св-06Х14, Св-08Х14ГНТ, Св-Х17Т, Св-13Х25Т, Св-01Х19Н9, Св-04Х19Н9, Св-08Х16Н8М2 (ЭП-377), Св-06Х19Н9Т, Св-08Х18Н8Г2Б (ЭП-307), Св-07Х18Н9ТЮ...

В зависимости от назначения стальную сварочную проволоку подразделяют на проволоку для сварки (наплавки) и проволоку для изготовления электродов (условное обозначение – Э). Это обусловлено более жёсткими предельными отклонениями по диаметру проволоки для изготовления электродов. Назначение проволоки следует оговаривать в заказе.

По виду поверхности низкоуглеродистую и легированную проволоку подразделяют на неомеднённую и омеднённую (О). Омеднённую проволоку лучше использовать для механизированной и автоматической сварки (улучшается контакт и меньше изнашивается подающий механизм). Специальные требования к омеднению поверхности проволоки (включая содержание меди) устанавливаются техническими условиями. Необходимость поставки проволоки с омеднённой поверхностью оговаривается в заказе.

По требованию потребителя проволока может изготавливаться из стали, выплавленной электрошлаковым (Ш), вакуумно-дуговым (ВД) переплавом или в вакуумно-индукционных печах (ВИ). Дополнительные требования к металлу проволоки (например, ужесточение норм содержания вредных и посторонних

примесей) устанавливаются соглашением сторон. В условном обозначении сварочной проволоки указывают диаметр и марку, приведённые выше индексы, характеризующие способ выплавки, назначение и вид поверхности, а также стандарт.

2) Условные обозначения марок проволоки

Условные обозначения марок проволоки состоят из индекса Св (сварочная) и следующих за ним цифр и букв. Цифры, следующие за индексом Св, указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Далее следует обозначение химических элементов, содержащихся в сплаве. Химические элементы обозначены следующими буквами: А – азот (в высоколегированных проволоках); 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 элементов, указывают среднее значение содержания элементов в процентах. Если цифр после обозначения элемента нет, то содержание его менее или равно 1 %.

Буква А в конце условного обозначения указывает на повышенную чистоту металла в отношении содержания серы и фосфора. Если стоит двойное А (АА), то содержание серы и фосфора ещё меньше, чем с А.

3) Примеры условных обозначений проволоки:

а) Проволока сварочная диаметром 3 мм, марки Св-08А, для сварки (наплавки) с неомеднённой поверхностью:

Проволока 3 Св-08А ГОСТ 2246-70.

б) Проволока сварочная диаметром 4 мм, марки Св-04Х19Н9, для изготовления электродов:

Проволока 4 Св-04Х19Н9 – Э ГОСТ 2246-70.

в) Проволока сварочная диаметром 2 мм, марки Св-30Х25Н16Г7, для сварки (наплавки), сталь выплавлена электрошлаковым переплавом:

Проволока 2 Св-30Х25Н16Г7 – Ш ГОСТ 2246-70.

г) Проволока сварочная диаметром 1,6 мм, марки Св-08Г2С, для сварки (наплавки) с омеднённой поверхностью:

Проволока 1,6 Св-08Г2С – О ГОСТ 2246-70.

д) Проволока сварочная диаметром 2,5 мм, марки Св-08ХГСМФА, для изготовления электродов, сталь выплавлена в вакуумно-индукционной печи, омеднённая:

Проволока 2,5 Св-08ХГСМФА–ВИ–Э–О ГОСТ 2246-70.

4) Технические требования

Стальная сварочная проволока выпускается 17 типоразмеров следующих диаметров, мм: 0,3; 0,5; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,5; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 12,0.

Допускается увеличение предельных отклонений по диаметру в 1,5 раза для проволоки, подвергаемой травлению. Овальность проволоки не должна превышать предельных отклонений по диаметру.

Проволоку изготавливают из стали, химический состав которой приведен в зависимости от марки в таблице 2 ГОСТ 2246-70.

Поверхность проволоки должна быть чистой и гладкой, без трещин, расслоений, плён, закатов, раковин, забоин, окалины, ржавчины, масла и других загрязнений. На поверхности проволоки допускаются риски (в том числе затянутые), царапины, местная рябизна и отдельные вмятины при глубине, не превышающей предельного отклонения по диаметру проволоки.

По требованию потребителя проволока поставляется с улучшенной поверхностью. В этом случае на поверхности допускаются мелкие волочильные риски, царапины, следы шлифования, местная рябизна и отдельные вмятины при глубине каждого из пороков не более 1/4 предельного отклонения по диаметру.

На поверхности низкоуглеродистой и легированной проволоки не допускается наличие технологических смазок, за исключением следов мыльной смазки, графита и серы.

Высоколегированная проволока должна поставляться в травлёном и отбеленном состоянии или после термической обработки в инертной атмосфере со светлой, светло-матовой или серой поверхностью, без всяких следов смазки.

Проволока должна быть принята техническим контролем предприятия-изготовителя.

Стальная сварочная проволока, применяемая в сравнительно небольших количествах, изготавливается по техническим условиям (ТУ), разработанным, согласованным и утвержденным в установленном порядке. Как правило, в ТУ регламентируются только химический состав и некоторые специальные требования, а общие технические требования, методы испытаний, маркировка, упаковка, транспортировка и хранение устанавливаются по ГОСТ 2246-70.

5) Упаковка проволоки

Проволоку с неомеднённой поверхностью поставляют свернутой в мотки определённых размеров и массы, с омеднённой поверхностью – в мотках прямоугольного сечения. Для проволок диаметром 1,6...3,0 мм требуемые размеры мотков оговаривают в заказе.

По соглашению сторон, проволоку поставляют намотанной на катушки или в кассетах. Для механизированной или автоматической сварки лучше использовать проволоку, намотанную на катушку, так как это исключает перемотку.

Проволока в мотках (катушках, кассетах) должна состоять из одного отрезка, свёрнутого не перепутанными рядами и плотно увязанного таким образом, чтобы исключить возможность «распушивания» или разматывания мотка. Концы проволоки должны быть легко находимыми. Допускается контактная стыковая сварка отдельных кусков проволоки одной плавки. При этом поверхность проволоки в зоне сварного соединения должна соответствовать ГОСТ 2246-70.

Каждый моток должен быть плотно перевязан мягкой проволокой не менее чем в трёх местах, равномерно расположенных по периметру. Мотки проволоки одной партии допускается связывать в бухты. Масса одного мотка или бухты не должна превышать 80 кг. Превышение по массе допускается по согласованию сторон.

На каждый моток (бухту, кассету, катушку) крепят ярлык с указанием завода-изготовителя (товарный знак), номера партии, условного обозначения проволоки и клейма технического контроля.

Каждый моток (бухта, кассета, катушка) проволоки диаметром до 0,5 мм должен быть обёрнут в водонепроницаемую двухслойную упаковочную бумагу и упакован в плотный деревянный ящик или другую тару. При диаметре более 0,5 мм проволоку дополнительно упаковывают в полимерную плёнку, тарную или рогожную ткань, или в хлопчатобумажную ленту с последующей обвязкой не менее чем в трёх местах мягкой проволокой.

На каждой упаковке крепят металлический ярлык с данными. При упаковке в жёсткую тару допускается бумажная этикетка.

Проволока поставляется партиями. Каждая партия должна состоять из проволоки одной марки, одной плавки, одного диаметра, одного назначения и одного вида поверхности. Каждая партия проволоки должна иметь сертификат с указанием предприятия-изготовителя (товарный знак), условного обозначения проволоки, номеров плавки и партии, состояния поверхности и химического состава. При отсутствии сертификата должен быть проверен химический состав проволоки. При несоответствии химического состава проволока не может быть использована для сварки.

6) Транспортировка и хранение

Транспортировка производится транспортом всех видов в крытых транспортных средствах, в соответствии с правилами, действующими на транспорте данного вида. С согласия потребителя допускается транспортировка проволоки на крупногабаритных катушках массой 1 т и более в открытом подвижном составе.

Проволока должна храниться в сухом, закрытом помещении, защищающем её от воздействия атмосферных осадков и почвенной влаги, в условиях, предохраняющих проволоку от появления ржавчины, загрязнения и механических повреждений.

1.3.1.2 Сварочная проволока из алюминия и алюминиевых сплавов

1) Классификация и условное обозначение

При сварке плавлением алюминия и его сплавов используют тянутую и прессованную сварочную проволоку из алюминия и алюминиевых сплавов по ГОСТ 7871-75, который предусматривает изготовление проволоки 14 марок:

Св А97 , Св А85Т, Св А5, Св АМц, Св АМг3, Св АМг4, Св АМг5, Св 1557, Св АМг6, Св АМг63, Св АМг61, Св АК5, Св АК10, Св 1201.

В условном обозначении проволоки указывают её диаметр, марку сплава и обозначение стандарта.

Пример условного обозначения сварочной проволоки диаметром 2 мм из алюминиевого сплава марки АМц:

2-Св АМц ГОСТ 7871-75.

2) Технические требования

Проволоку изготавливают из алюминия и алюминиевых сплавов, химический состав которых в зависимости от марки приведён в ГОСТ 7871-75. Диаметры проволоки и их предельные отклонения в зависимости от способа изготовления (мм): тянутая – 0,8; 0,9; 1,00; 1,12; 1,25; 1,40; 1,60; 1,80; 2,00; 2,24; 2,50; 2,80; 3,15; 3,55; 4,00; 4,50; 5,00; 5,60; 6,30; 7,10; 8,00; 9,00; 10,00; прессованная – 4,50; 5,00; 5,60; 6,3; 7,10; 8,00; 9,00; 10,00; 11,20; 12,50. Овальность проволоки не должна превышать предельных отклонений по диаметру.

Поверхность проволоки диаметром до 4 мм подвергают химической обработке. После обработки проволока должна иметь блестящую поверхность с параметрами шероховатости $Ra \leq 2,5$ мкм по ГОСТ 2789-73.

3) Условия поставки

Проволоку диаметром 4 мм и менее определённой длины наматывают на катушки механическим способом рядами, без перегибов и зазоров. Концы проволоки должны выходить на боковую поверхность щёк катушки и должны быть легко находимы.

Проволока на катушках должна состоять из одного отрезка. Допускается стыковая сварка проволоки одной плавки, при этом проволока в месте сварки должна удовлетворять требованиям ГОСТ.

Проволоку диаметром более 4 мм поставляют в мотках или в пучках длиной не менее 1 м, без химической обработки поверхности. Внутренний диаметр мотка должен быть не более 750 мм. Проволока в мотках должна иметь чистую

поверхность, без плён, трещин, закатов, вмятин, заусенцев, расслоений и резких перегибов.

По заказу потребителя в мотках без химической обработки поверхности поставляют и проволоку диаметром до 4 мм.

Не допускаются местные дефекты поверхности проволоки, глубина которых превышает предельные отклонения по диаметру.

На поверхности проволоки допускаются белые и тёмные пятна без шероховатостей, а также цвета побежалости.

4) Упаковка проволоки

Проволока поставляется партиями. Каждая партия должна состоять из проволоки одного диаметра, сплава одной марки, одной плавки и одного состояния. Масса партии не ограничивается.

Катушки с проволокой помещают в полиэтиленовый пакет вместе с контрольным пакетом порошка обезвоженного селикагеля-индикатора и герметизируют при относительной влажности окружающего воздуха менее 20% в течение 30 мин после химической обработки. Герметичность упаковки оценивают визуально по цвету селикагеля. Герметичность следует считать нарушенной, если селикагель имеет розовый цвет.

Герметизированные полиэтиленовые пакеты с катушками упаковывают в картонные, пластмассовые или деревянные ящики.

Сварочная проволока из других алюминиевых сплавов изготавливается по техническим условиям, разработанным, согласованным и утвержденным в установленном порядке.

1.3.1.3 Сварочная проволока и прутки из меди и сплавов на основе меди

1) Классификация.

При сварке, наплавке и пайке меди и её сплавов используют сварочные проволоку и прутки из меди и сплавов на медной основе по ГОСТ 16130-90. Сварочную проволоку по указанному стандарту изготавливают из меди и её сплавов 17 марок и определённых диаметров.

ГОСТ 16130-90 содержит приложение, в котором указано назначение проволоки и прутков из меди и сплавов на её основе.

Сварочные прутки изготавливают из меди и её сплавов 12 марок. Овальность проволоки и прутков не должна превышать предельных отклонений по диаметру.

2) Условные обозначения проволоки.

В условном обозначении проволоки и прутков указывают марку сплава, состояние поставки, диаметр, обозначение стандарта.

Проволока производится мягкой (М), полутвёрдой (ПТ) и твёрдой (Т) в соответствии с ГОСТ 16130-90. Прутки производятся мягкими или твёрдыми. Состояние проволоки и прутков оговаривается в заказе на поставку.

Примеры условных обозначений:

а) Проволока диаметром 2 мм, марки ЛК 62-0,5 мягкая:

Проволока ЛК 62-0,5 - М - 2 ГОСТ 16130-90.

б) Пруток диаметром 6 мм, марки ЛКБО 62-0,2-0,04-0,5, твёрдый:

Пруток ЛКБО 62-0,2-0,04-0,5 - Т- 6 ГОСТ 16130-90.

3) Технические требования

Прутки изготавливают: немерной длины – от 1 до 5 м; мерной длины или длины кратной мерной, оговорённой в заказе – в пределах немерной; мерной длины – по требованию потребителя.

В партии прутков немерной длины допускаются укороченные до 0,5 м в количестве не более 15 % массы сдаваемой партии.

Прутки марки ЛОК 59-1-0,3 поставляются в бухтах. Длина прутка в бухте должна быть не менее 10 м. Допускается поставлять в бухтах прутки остальных марок длиной не менее 3 м. Химический состав проволоки и прутков приведён в ГОСТ 16130-90.

Поверхность проволоки и прутков должна быть чистой и гладкой, без трещин и расслоений. На поверхности проволоки и прутков не допускаются дефекты (плёны, закаты, раковины, царапины, уколы, вмятины и др.), глубина которых (при их удалении) превышает половину предельных отклонений по диаметру. Покраснение поверхности после травления и цвета побежалости браковочным признаком не являются.

Число перегибов проволоки марки М1 (твёрдой) должно быть не менее семи – для диаметров (1,2...2,5) мм; пяти – для диаметра 3,0 мм; четырёх – для диаметров (4,0...6,0) мм. В изломе прутки не должны иметь посторонних включений, расслоений и пустот.

С твёрдой латунной проволоки и прутков должны быть сняты остаточные напряжения низкотемпературным отжигом или механическим путём. Прутки должны быть выправлены. Их кривизна не должна превышать 4 мм на 1 м длины. Прутки должны быть ровно обрезаны. Допускается поставлять прутки с обрубленными концами.

4) Условия поставки

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 1000 кг.

Проволока должна поставляться свёрнутой в мотки. Размеры и масса мотков должны соответствовать ГОСТ. Допускается поставка мотков пониженной массы в количестве 10 % партии с массой мотка не менее 3 кг для проволоки диаметром до 2 мм; 20% партии с массой мотка не менее 5 кг для проволоки диаметром более 2 мм.

Проволока должна быть свернута в мотки правильными, не перепутанными рядами, без резких изгибов.

По соглашению сторон проволока диаметром (0,8...2,0) мм должна поставляться намотанной на катушки. Допускается также поставка проволоки диаметром более 2 мм на крупногабаритных катушках или в мотках повышенной массы.

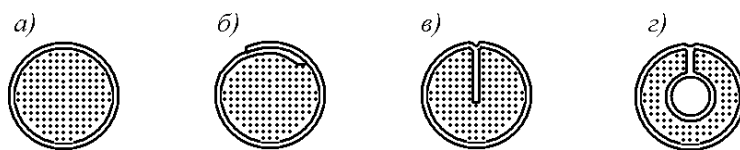
Проволока должна быть намотана на катушки без ослабления и перепутывания витков.

1.3.1.4 Порошковая проволока

1) Конструкция порошковой проволоки

Оболочка порошковой проволоки по конфигурации может быть самой различной. На рисунке 1.23 приведены наиболее распространённые формы оболочек. Толщина ленты, из которой свернута трубка или стенки тянутой

трубки, составляет (0,2...0,5) мм. Вместо проволоки может изготавливаться порошковая лента. Внутри оболочка заполнена смесью порошков из газо- и шлакообразующих элементов, ферросплавов и различных металлических порошков.



а) – трубчатая; б) – с нахлёстом; в) – с загибом оболочки; г) – двухслойная

Рисунок - 1.23 Виды конструкции порошковой проволоки

Металлическая оболочка, по которой подводится ток, обеспечивает удержание порошкового сердечника и возможность осуществлять непрерывный процесс плавления при малом вылете электрода, предотвращая тем самым преждевременное термическое разложение сердечника.

Сердечник выполняет следующие функции: стабилизирует дуговой разряд, защищает металл в сварочной ванне от воздуха, осуществляет раскисление и легирование металла шва, регулирование процесса переноса расплавленного электродного материала в сварочную ванну, формирование шва и др.

2) Основные преимущества порошковых проволок

Порошковые проволоки в сравнении с другими сварочными материалами в том, что необходимые механические свойства сварного соединения, прочностные и пластические характеристики швов гарантируются без дополнительной термической обработки, за счет оптимального подбора сердечника, исходя из конкретной технической задачи. Состав порошка рассчитывается и можно получить любой химический состав наплавленного металла.

Кроме того, благодаря использованию порошковых проволок, достигается:

- повышение производительности сварочных работ в 2-5 раз;
- возможность проведения сварочных работ без газа и флюса;
- малые потери металла на разбрызгивание;
- оптимальная форма швов;

- простота в эксплуатации и хорошие оперативные свойства;
- лучшие санитарно-гигиенические характеристики;
- возможность применения в монтажных полевых условиях.

3) Область применения порошковых проволок:

- особо ответственные металлоконструкции с тяжелым режимом работы;
- мостовые сооружения;
- резервуары и технологические емкости химических и нефтехимических объектов;
- ребра жесткости корпусов судов, барж, платформ, балок эстакад
- строительные конструкции высотных зданий и промышленных объектов;
- технологические и магистральные трубопроводы кожухи, воздухонагреватели доменных печей

4) Классификация и обозначение

Порошковую проволоку изготавливают по ГОСТ 26271-84. По условиям применения проволока подразделяется.

По способу защиты бывает:

- Самозащитная – когда защита зоны сварки от окружающей среды производится элементами выделяющимися от сгорания порошка.
- С дополнительной защитой – флюс, газ или смесь газов.

По составу сердечника проволока бывает:

- рутилоорганические ПП-АН1;
- карбонатнофлюоритные –ПП-АН7;
- флюоритные –ПП-2ДСК;
- рутиловые –ПП-АН10;
- рутил-флюоритные – ПП-АН9.

Первые три типа сердечников применяются в самозащитных проволоках, последние два – в проволоках с дополнительной газовой защитой.

Порошковые проволоки, применяемые при сварке в среде защитных газов, приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Порошковая проволока для сварки в среде защитных газов

Марка проволоки	Диаметр, мм	Область применения
1	2	3
ПП-АН-8	2.2; 2.8	Строительные металлоконструкции высотных и промышленных объектов, строительное и горное оборудование
ПП-АН-9	2.2; 2.4	Каркасы, колонны, соединения балок, сборочные сварки
ПП-АН-21	1.0; 1.2; 1.6	Строительные металлоконструкции, арматура, соединения рельс
ПП-АН-25	1.2; 1.4	Трубные конструкции, строительные металлоконструкции высотных объектов, корпусная сборочная сварка
ПП-АН-26	1.2; 1.4; 1.6; 2.0	Сварка при производстве конструкций общего назначения
ПП-АН-29	1.2; 1.6; 2.2	Сварка ребер жесткости корпусов судов, барж, сборочная сварка пластин и секций
ПП-АН-57	1.2; 1.6	Сварка при производстве конструкций общего назначения
ПП-АН-59	1.2; 1.4, 1.6; 2.0	Судостроение и строительство
ПП-АН-61	1.2; 1.4, 1.6, 2.0	Буровые платформы, морские суда и агрегаты для химической промышленности
ПП-АН-63	1.2; 1.4; 1.6; 2.0	Судостроение, стальные мостовые сооружения и резервуары, строительные металлоконструкции
ПП-АН-69	1.2; 1.6	Соединения в машиностроении, строительстве, сварка деталей кранов и грузоподъемных механизмов
ПП-АН-70М	1.2; 1.4; 1.6	Сварка соединений низкоуглеродистых низколегированных сталей

В соответствии с допустимыми пространственными положениями сварки и условиями формирования сварного шва проволока подразделяется: для нижнего положения (Н); для нижнего, горизонтального на вертикальной плоскости (Г); для нижнего, горизонтального, вертикального (В); для всех положений (У). С использованием принудительного формирования – для горизонтального (ГП); вертикального (ВП); для всех положений (УП).

В соответствии с величиной предела текучести металла шва порошковая проволока подразделяется на типы: Д, 34, 39, 44, 49, 54, 59, 64, 69. Для каждого типа σ_B и δ приводятся в таблице 1 ГОСТ 26271-84. Эти же величины для типа Д указываются в нормативно-технической документации на конкретные марки проволоки.

В соответствии с температурой испытаний, при которой обеспечивается ударная вязкость металла шва не менее 35 Дж/см², порошковая проволока подразделяется на уровни: Р, К, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6. В таблице 2 ГОСТ 26271-84 приведены температуры испытаний и ударная вязкость для каждого уровня. Величина уровня Р указывается в нормативно-технической документации.

В соответствии с химическим составом металла шва порошковая проволока подразделяется по содержанию углерода, серы и фосфора на категории А, В, С (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Классификация порошковой проволоки по химическому составу

Категория	Содержание элементов, %		
	Углерод	Сера	Фосфор
А	0,15	0,03	0,03
В	0,15	0,04	0,04
С	0,25	0,03	0,04

Диаметры порошковой проволоки и допустимые пределы отклонения по его величине должны соответствовать указанным в таблице 3 ГОСТ 26271-84. Величина их от 0,8 до 6,0 мм.

Обозначение марки проволоки выполняют в соответствии со следующей схемой.

Обозначение должно начинаться индексом «ПП», после которого через дефис ставятся буквенные или цифровые обозначения, указывающие шифр регистрации сварочного материала, принятый в отрасли организации-разработчика (рисунок 1.24).

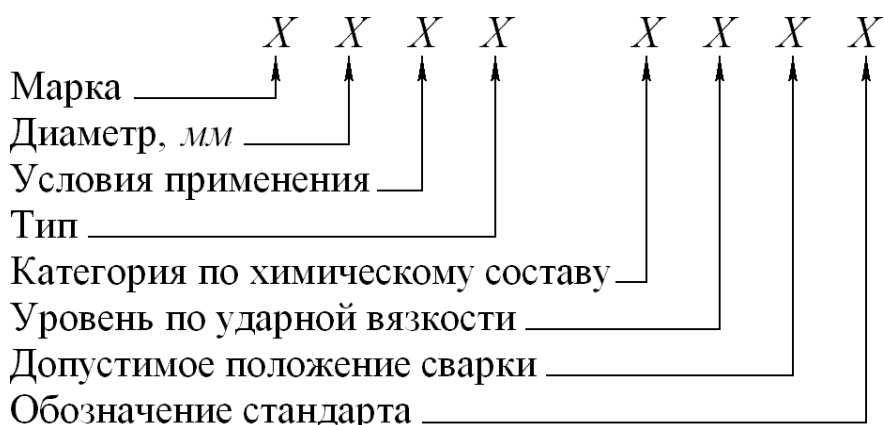


Рисунок 1.24 – Последовательность обозначения проволоки Пример

условного обозначения порошковой проволоки марки ПП-АНЗ

диаметром 3,0 мм, самозащитной (ПС), по величине σ_T металла шва типа 44, по химическому составу металла шва категории А, обеспечивающей ударную вязкость металла шва не ниже 35 Дж/см² при температуре минус 20°C (2), для сварки в нижнем положении (Н):

ПП-АНЗ 3,0 ПС 44 - А2Н ГОСТ 26271-84.

5) Условия поставки и упаковка проволоки

Порошковая проволока поставляется на катушках или в мотках и сопровождается соответствующим документом.

Проволока сворачивается в мотки. На каждый моток крепят ярлык. Моток оборачивают в водонепроницаемую бумагу или помещают в мешок из полиэтиленовой плёнки и укладывают в металлические барабаны. Швы

заваривают или запаивают. Масса брутто упаковки должна быть от 20 до 130 кг. Для предупреждения увлажнения в каждое упаковочное место помещают силикагель. На обечайку каждого барабана крепят ярлык.

Испытания проволоки производят по ГОСТ 26271-84. Транспортировку порошковой проволоки, упакованной в металлические барабаны, провозят пакетами, сформированными на плоских поддонах. Перевозка проволоки в пакетах, размещение и крепление должны производиться в соответствии с действующими правилами перевозки грузов. Транспортная маркировка – по ГОСТ 14192-72 с нанесением знаков «Беречь от влаги» и «Хрупкое. Осторожно».

Порошковая лента применяется при автоматической наплавке. Выпускается толщиной 0,2 – 1,0 мм и шириной 15 – 100 мм.

1.3.2 Определение и классификация электродов. ГОСТ. Типы электродов

1.3.2.1 Металлические плавящиеся электроды для ручной дуговой сварки и наплавки сталей

1) Классификация электродов для ручной дуговой сварки сталей Плавящиеся электроды представляют собой стержни, изготовленные из сварочной проволоки по ГОСТ 2246-70 длиной до 450 мм, на поверхность которых нанесён слой покрытия.

Классификация и общие технические условия на электроды приведены в ГОСТ 9466-75. Настоящий стандарт распространяется на покрытые металлические электроды для ручной дуговой сварки сталей и наплавки поверхностных слоёв с особыми свойствами, изготавливаемые способом опрессовки. Стандарт не распространяется на электроды для наплавки слоёв из цветных металлов.

По назначению электроды подразделяются на 5 групп:

- для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с σ_B до 600 МПа (У);
- для сварки легированных конструкционных сталей с $\sigma_B > 600$ МПа (Л);
- для сварки легированных теплоустойчивых сталей (Т);
- для сварки легированных сталей с особыми свойствами (В);

- для наплавки поверхностных слоёв с особыми свойствами (Н).

Подразделение электродов на типы осуществляется по ГОСТ 9467-75, ГОСТ 10051-75 и ГОСТ 10052-75. Эти ГОСТы устанавливают группу индексов, указывающих характеристики наплавленного металла и металла шва, а также их химический состав и механические свойства.

Подразделение электродов на марки осуществляется по стандартам или техническим условиям. Каждому типу электродов может соответствовать одна или несколько марок.

По толщине покрытия в зависимости от отношения D/d (D – диаметр покрытия, d – диаметр стержня) электроды подразделяются на следующие группы:

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

По видам покрытия электроды подразделяются на группы:

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

Электроды с покрытием смешанного вида имеют соответствующее двойное условное обозначение, с прочими видами покрытий – П. При наличии в составе покрытия железного порошка в количестве более 20% к обозначению вида покрытия добавляется буква Ж.

По допустимым пространственным положениям сварки или наплавки электроды подразделяются на группы:

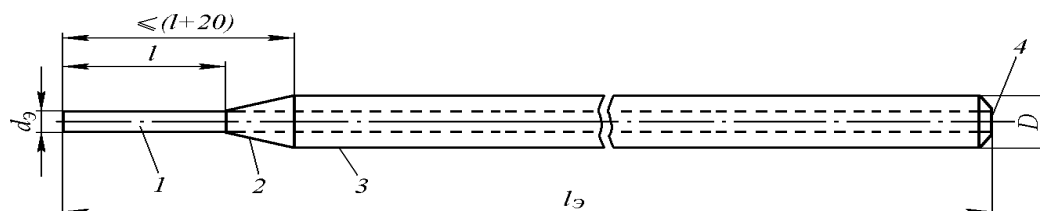
- для всех положений (1);
- для всех положений, кроме вертикального сверху вниз (2);
- для нижнего, горизонтального на вертикальной плоскости и вертикального снизу вверх (3);
- для нижнего в лодочку (4).

По роду и полярности применяемого при сварке или наплавке тока, а также по номинальному напряжению холостого хода, используемого источника питания сварочной дуги переменного тока частотой 50 Гц электроды обозначаются соответствующими индексами – от 0 до 9 (см. таблицу 1.3).

Таблица 1.3 – Обозначение электродов в зависимости от рода полярности сварочного тока и номинального напряжения холостого хода источника питания

Рекомендуемая полярность постоянного тока	Напряжение холостого хода источника переменного тока, В		Обозначение
	Номинальное	Предельное отклонение	
Обратная	-	-	0
Любая	50	± 5	1
Прямая			2
Обратная			3
Любая	70	± 10	4
Прямая			5
Обратная			6
Любая	90	± 5	7
Прямая			8
Обратная			9

2) Размеры электродов должны соответствовать указанным на рисунке 1.25 и в таблице 1.4.



1 – стержень; 2 – участок перехода; 3 – покрытие; 4 – контактный торец

Рисунок 1.25 – Конструкция электрода

Форма зачистки покрытия контактного конца конусная, округлая или комбинированная. Контактный конец должен быть свободен от покрытия. На

10 % контрольной партии допускается плоская зачистка покрытия (с условием отсутствия покрытия на поверхности торца стержня). На контактный торец может быть нанесён слой ионизирующего вещества, состав которого соответствует стандарту или ТУ на марку данного электрода.

Таблица 1.4 - Параметры электродов для ручной дуговой сварки

Номинальный диаметр электрода, определяемый диаметром стержня d , мм	Номинальная длина электрода L , мм (при предельном отклонении ± 3 мм)		Длина зачищенного от покрытия участка l , мм (пред. откл. ± 5)
	Низколегированные или легированные	Высоколегированные	
1,6	200, 250	150, 200	20
2,0	250	200, 250	
2,5	250, 300	250	
3,0	300, 350		25
4,0	350, 450	350	
5,0	450	350 450	
6,0			
8,0			
10,0			
12,0			
			30

3) Структура и примеры условного обозначения электродов

Обозначение электродов отечественного производства имеет следующую структуру (рисунке 1.26):



Рисунок 1.26 – Структура условного обозначения отечественных электродов

Примечание. Для электродов марок, не относящихся к типам по ГОСТ 9467-75, ГОСТ 10051-75 или ГОСТ 10052-75, в условном обозначении тип электродов не приводят, а вместо стандарта на тип указывают обозначение стандарта или ТУ на электроды конкретной марки.

В условных обозначениях электродов для сварки углеродистых и низколегированных сталей с $\sigma_B = 600$ МПа после буквы Е тире не ставят.

Условное обозначение должно быть указано на этикетках или в маркировке коробок, пачек и ящиков с электродами.

Во всех видах документации (кроме конструкторской) условное обозначение электрода должно состоять из марки, диаметра и обозначения ГОСТа на электроды.

Примеры условных обозначений

а) Электроды типа Э42А по ГОСТ 9467-75, марки УОНИИ-13/45, диаметром 3,0 мм для сварки углеродистых и низколегированных сталей (У), с толстым покрытием (Д), с установочной группой индексов по ГОСТ 9467-75, указывающих характеристики наплавленного металла и металла шва (43 2(5)), с основным покрытием (Б), для сварки во всех пространственных положениях (1), на постоянном токе обратной полярности (0) обозначают:

- на этикетках или в маркировке коробок, пачек, ящиков –

Э 42А - УОНИИ-13/45 - 3,0 - УД ГОСТ9466– 75, ГОСТ9467 – 75;

Е 43 2(5) – Б10

- в документации – электроды УОНИИ-13/45–3,0 ГОСТ 9466-75.

б) Электроды типа Э85 по ГОСТ 9467-75, марки ЦЛ-18, диаметр 4,0 мм, для сварки низколегированных конструкционных сталей (Л), с толстым покрытием (Д), с установочной группой индексов по ГОСТ 9467-75, указывающих характеристики наплавленного металла и металла шва (18Х1Г1-2), с основным покрытием (Б), для сварки во всех пространственных положениях (1), на постоянном токе обратной полярности (0) обозначают:

- на этикетках или в маркировке коробок, пачек, ящиков –

$$\frac{\text{Э85} - \text{ЦЛ} - 18 - 4,0 - \text{ЛД}}{\text{Е} - 18\text{Х1Г1} - 2 - \text{Б10}} \text{ГОСТ9466} - 75, \quad \text{ГОСТ9467} - 75;$$

- в документации – электроды ЦЛ-18 – 4,0 ГОСТ 9466-75.

в) Электроды типа Э-09Х1МФ по ГОСТ 9467-75, марки ЦЛ-20, диаметр 4,0 мм, для сварки легированных теплоустойчивых сталей (Т), с толстым покрытием (Д), с установленной группой индексов, указывающих характеристики наплавленного металла и металла шва (27), с основным покрытием (Б), для сварки во всех пространственных положениях (1), на постоянном токе обратной полярности (0) обозначают:

- на этикетках или в маркировке коробок, пачек, ящиков –

$$\frac{\text{Э} - 09\text{Х1МФ} - \text{ЦЛ} - 20 - 4,0 - \text{ТД}}{\text{Е} - 27 - \text{Б10}} \text{ГОСТ9466} - 75, \quad \text{ГОСТ9467} - 75;$$

- документации – электроды ЦЛ-20 – 4,0 ГОСТ 9466-75.

г) Электроды типа Э-10Х25Н13Г2Б, по ГОСТ 10052-75, марки ЦЛ-9, диаметр 5,0 мм, для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами

(В), с толстым покрытием (Д), с установленной по ГОСТ 10052 группой индексов, указывающих характеристики наплавленного металла и металла шва (2075), с основным покрытием (Б), для сварки в нижнем, горизонтальном на вертикальной плоскости и вертикальном снизу вверх положениях (3), на постоянном токе обратной полярности (0) будут обозначены:

- на этикетках или в маркировке коробок, пачек, ящиков –

$$\frac{\text{Э} - 10\text{X}25\text{H}13\text{Г}2\text{Б} - \text{ЦЛ} - 9 - 5,0 - \text{ВД}}{\text{Е} - 2075 - \text{Б}30} \text{ГОСТ}9466-75, \text{ГОСТ}10052;$$

- в документации – электроды ЦЛ-9 – 5,0 ГОСТ 9466-75.

д) Электроды типа Э-11ГЗ по ГОСТ 10051-75, марки ОЗН-300У, диаметр 4,0 мм, для наплавки поверхностных слоёв с особыми свойствами (Н), с толстым покрытием (Д), с установленной по ГОСТ 10051-75 группой индексов, указывающих характеристики наплавленного металла 300/33, с основным покрытием (Б), для наплавки в нижнем положении (4), на постоянном токе обратной полярности (0) будут обозначены:

- на этикетках или в маркировке коробок, пачек, ящиков –

$$\frac{\text{Э} - 11\text{ГЗ} - \text{ОЗН} - 300\text{У} - 4,0 - \text{НД}}{\text{Е} - 300/33 - 1 - \text{Б}40} \text{ГОСТ}9466-75, \text{ГОСТ}10051-75.$$

- в документации – электроды ОЗН-300У – 4,0 ГОСТ 9466-75.

Обозначение электродов по международному стандарту ISO производится в зависимости от группы сталей, для сварки которых предназначен электрод. ISO-2560 – электроды для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей, ISO-3580 – электроды для сварки высоколегированных сталей.

4) Технические требования

Отечественные электроды должны быть изготовлены в соответствии с требованиями ГОСТ 9466-75, ГОСТ 9467-75, ГОСТ 10051-75, ГОСТ 10052-75 и стандартов или ТУ на электроды конкретных марок. Этими ГОСТами

предусматриваются требования к внешнему виду, механической прочности, влагостойкости электродного покрытия, стойкости к ударам при падении, разнотолщинности покрытия по диаметру, химическому составу электродного стержня, химическому составу и механическим свойствам наплавленного металла и металла шва, сварочно-технологическим свойствам электродов.

5) Правила приёмки и методы испытаний электродов устанавливаются по ГОСТ 9466-75.

Методы испытаний электродов включают проверку:

- геометрических размеров электрода и покрытия;
- сварочно-технологических свойств;
- химического состава;
- механических свойств;
- содержания ферритной фазы в наплавленном металле;
- склонности к межкристаллитной коррозии.

6) Упаковка, транспортировка и хранение

Упаковка, транспортировка и хранение электродов регламентируются ГОСТ 9466-75. Главное условие – герметичность упаковки.

На каждой коробке или пачке с электродами должна быть этикетка или маркировка, содержащая следующие данные: наименование или товарный знак предприятия-изготовителя; условное обозначение электродов; номер партии и дату изготовления; область применения электродов; режимы сварочного тока в зависимости от диаметра электродов и положения сварки или наплавки; особые условия выполнения сварки и наплавки; механические и специальные свойства металла шва, наплавленного металла или сварного соединения, не указанные в условном обозначении электродов; допустимое содержание влаги в покрытии перед использованием электродов; режим повторного прокаливания электродов; массу электродов в пачке или коробке.

Каждая партия электродов должна сопровождаться сертификатом, удостоверяющим соответствие электродов требованиям ГОСТ или ТУ на электроды данной марки.

В сертификате указывают:

- наименование или товарный знак предприятия-изготовителя;
- условное обозначение электродов;
- номер партии и дату изготовления; массу нетто партии в килограммах;
- марку проволоки электродных стержней с указанием обозначения стандарта или ТУ;

- фактический химический состав наплавленного металла;
- фактические значения показателей механических и специальных свойств металла шва, наплавленного металла или сварного соединения, являющихся приёмо-сдаточными характеристиками электродов данной марки.

7) Покрытия для электродов

Все покрытия должны удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечивать стабильное горение дуги;
- физические свойства шлаков, образующихся при плавлении электрода, должны обеспечивать нормальное формирование шва и удобное манипулирование электродом;
- обеспечивать получение металла шва заданного химического состава;
- обеспечивать спокойное и равномерное расплавление электродного стержня и покрытия, минимальное разбрызгивание электродного металла и высокую производительность сварки;
- обеспечивать лёгкую отделяемость шлака и достаточную прочность покрытий;
- сохранять физико-химические и технологические свойства электродов в течение определённого промежутка времени;
- не должны происходить реакции между шлаками, газами и металлом, способные вызвать образование пор в сварных швах;
- материалы покрытия должны хорошо измельчаться и не вступать в реакцию между собой или жидким стеклом в замесе;
- состав покрытий должен обеспечивать приемлемые санитарно-гигиенические условия труда при изготовлении электродов и в процессе их хранения.

Электродные покрытия делят на две группы: тонкие (стабилизирующие или ионизирующие) и толстые (качественные).

Назначение тонкого покрытия – облегчить возбуждение дуги и стабилизировать её горение. Используют легкоионизирующиеся вещества, такие как калий, натрий, барий, церий, кальций и др. Они применяются, как правило, в виде углекислых солей: мел – CaCO_3 , поташ – K_2CO_3 , углекислый барий – BaCO_3 и др. В качестве связующего вещества применяют жидкое стекло, представляющее собой силикат натрия – Na_2OSiO_2 . Покрытие наносят на стержень электрода слоем толщиной (0,1...0,25) мм, что составляет (1,5...2,0)% от массы электрода.

Тонкое покрытие не создаёт защиты для расплавленного металла шва, и при сварке происходит окисление и азотирование расплавленного металла. Шов получается хрупкий, пористый, с различными неметаллическими включениями. Поэтому электроды с тонким покрытием используют при выполнении неотвественных сварных швов.

Сварные соединения высокого качества выполняют электродами с толстым покрытием.

Для изготовления качественных покрытий применяют различные материалы (компоненты):

Ионизирующие или стабилизирующие компоненты, содержащие элементы с низким потенциалом ионизации, а также различные соединения, в состав которых входят калий, натрий, кальций и др.

Газообразующие компоненты – органические вещества (крахмал, пищевая мука, декстрин) либо неорганические вещества, обычно карбонаты (мрамор CaCO_3 , магнезит MgCO_3 и др.).

Элементы-раскислители – кремний, марганец, алюминий, используемые в виде сплавов этих элементов с железом (ферросплавы).

Шлакообразующие компоненты, составляющие основу покрытия: руды (титановая, марганцевая), минералы (ильменитовый и рутиловый концентраты, полевой шпат, кремнезем, гранит, мрамор, плавленый шпат и др.).

Легирующие элементы – для придания шву повышенной прочности, износоустойчивости, коррозионной стойкости и др. свойств. В качестве легирующих элементов используются ферросплавы, иногда чистые металлы.

Алюминий вводят в покрытие в виде пудры.

Связующие – водные растворы силикатов натрия и калия.

Формовочные добавки – вещества, придающие обмазочной массе лучшие пластические свойства: бентонит, каолин, декстрин, слюда и др.

Во всех электродных покрытиях при их плавлении плотность шлака должна быть ниже плотности металла сварочной ванны, что обеспечит его всплывание. Температурный интервал затвердевания шлака должен быть ниже температуры кристаллизации металла шва, иначе шлак не будет пропускать выделяющиеся газы. Шлак должен покрывать шов по всей поверхности ровным слоем.

Шлаки, образующиеся при плавлении электродных покрытий, бывают «длинные» и «короткие». «Длинные» – из-за кремнезёма. Вязкость их возрастает медленно с понижением температуры. Электроды, образующие такие шлаки, непригодны для сварки в вертикальном и потолочном положениях, так как сварочная ванна длительное время находится в жидком состоянии.

Для сварки во всех пространственных положениях применяют электроды, покрытия которых дают «короткие» шлаки. Возрастание вязкости таких шлаков с понижением температуры происходит быстро, поэтому застывший шлак препятствует стеканию металла, находящегося ещё в жидком виде. «Короткие» шлаки дают электроды с рутиловым покрытием.

8) Составы покрытий

Кислое покрытие содержит руды в виде окислов железа и марганца и кремнезём (шлакообразующая основа). Газовая защита осуществляется органическими составляющими и карбонатами. При плавлении оксиды выделяют кислород, способный окислить металл сварочной ванны и легирующие примеси. Для ослабления действия кислорода в покрытие вводят раскислители в виде ферросплавов. Наплавленный металл имеет относительно малую вязкость, пластичность и пониженное содержание легирующих примесей. Металл шва склонен к образованию кристаллизационных трещин при повышенном

содержании серы и углерода в основном металле, но не склонен к образованию пор при сварке кромок с окалиной или ржавчиной, а также при случайном удлинении дуги. Содержание кислорода в металле шва – до 0,12 %, водорода – до 15 см³ в 100 г металла. При сварке сталей с повышенным содержанием кремния возможно образование пор. Electrodes технологичны, однако наличие окислов марганца делает их токсичными. Образуется много сварочного аэрозоля. Они обладают повышенным разбрызгиванием металла.

К этому виду относятся покрытия АНО-2, СМ-5 и др.

Основное покрытие составлено на основе плавикового шпата (CaF₂) и мрамора (CaCO₃). Эти компоненты дают шлаковую основу и газовую защиту (за счёт разложения карбонатов и выделения СО и СО₂). Отсутствие в составе этого покрытия окислов железа и марганца позволяет широко легировать наплавленный металл. При сварке такими электродами можно получить металл шва с заданным химическим составом и хорошими механическими свойствами. В качестве раскислителей покрытие содержит ферротитан, ферромарганец, ферросилиций. Металл шва, выполненный электродами с основным покрытием, обладает большой пластичностью и ударной вязкостью. Мало склонен к старению. В металле шва кислорода – до 0,05 %, водорода – до 10 см³ на 100 г металла. Электродами с основным покрытием сваривают ответственные конструкции. Сварку проводят в основном на постоянном токе обратной полярности. Следует строго выполнять все необходимые требования по технологии и технике сварки. Electrodes с основным покрытием склонны к образованию пор при плохой зачистке кромок и удлинении дуги.

В эту группу входят покрытия электродов марок УОНИИ-13/45, УОНИИ-13/55, СМ-11, ОЗС-5, ТМУ-21У и др. Состав покрытия электродов марки УОНИИ-13/45: мрамор, плавиковый шпат, кварцевый песок, ферросилиций, ферромарганец, ферротитан, ферромolibден и жидкое стекло.

Целлюлозные покрытия содержат главным образом органические компоненты в качестве газообразующих и связующих веществ. В состав покрытий в качестве раскислителей введены ферромарганец, ферросилиций, в качестве шлакообразующего – рутил. Electrodes с таким покрытием удобны для

сварки в любом пространственном положении. Количество шлака небольшое, поэтому их лучше применять на монтаже. В металле шва кислорода – до 0,03 %, водорода – до 30 см³ на 100 г металла. Металл шва имеет пониженную пластичность и по свойствам близок к металлу, наплавленному электродами с рутиловым покрытием. При сварке нельзя допускать перегрева электрода, так как при перегреве выгорает покрытие и изменяется химический состав наплавленного металла. При сварке потери на разбрызгивание достигают 20 %.

К этой группе относятся электроды марок ВСЦ-1, ВСЦ-2, ОСЦ-1 и др. Покрытия этих электродов состоят из целлюлозы, органической смолы, ферросплавов, талька и др.

Рутиловые покрытия по качеству наплавленного металла лежат в промежутке между кислыми и основными. Основным компонентом является рутил (TiO₂ – диоксид титана). Шлакообразующими компонентами служат рутил, полевой шпат, магнезит и др. В качестве раскислителя и легирующего компонента применяют ферромарганец. Рутиловые покрытия технологичны, менее вредны для дыхательных органов сварщика, чем другие. В металле шва кислорода – до 0,09 %, водорода – до 30 см³ на 100 г металла. Водород удаляется почти полностью в течение 2 – 7 недель или за 6 часов при 250 °С. Наплавленный металл мало склонен к образованию пор. Пористость может появиться из-за превышения сварочных токов при сварке тавровых швов с зазорами и сварке тонкого металла электродами большого диаметра. Шлак легко отделяется. Разбрызгивание в 4 – 5 раз меньше, чем у кислых покрытий.

В практике применяют электроды с покрытием марок АНО-3, АНО-4, МР-3, МР-4, ОЗС-4, ОЗС-6 и др.

1.3.2.2 Электроды для сварки легированных конструкционных сталей

1) Электроды для сварки легированных теплоустойчивых сталей

Все электроды данного класса имеют фтористо-кальцевое покрытие и позволяют выполнять сварку только на постоянном токе обратной полярности, в любом пространственном положении.

Электроды 48Н – 3 и 48Н – 6 служат для сварки конструкций из теплоустойчивых сталей типа 48ТС. За основу взято фтористо-кальцевое

покрытие типа УОНИ 13, а необходимое легирование металла шва достигается применением электродных стержней легированных проволок.

Электроды УОНИИ 13/45МХ – для сварки труб и других конструкций из стали 12МХ.

Для сварки конструкций из сталей 12МХ, 15МХ, 12Х1МФ, 15Х1М1Ф с рабочей температурой до 510⁰С применяют электроды марки ОЗС – 11; с рабочей температурой до 540⁰С - ТМЛ-1У. покрытие - рутиловое (Р).

Сварка оборудования и трубопроводов из сталей 12МХ, 15МХ, 12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 20МХЛ, 12Х2М1 при работе до температуры 570⁰С применяются электроды марок: ТМЛ-3У, ТМЛ-48. Покрытие основное (Б).

Электроды для сварки легированных теплоустойчивых сталей поставляются по ГОСТ 9466-75 и ГОСТ 9467-75.

2) Электроды для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами

Для ручной дуговой сварки коррозионностойких, жаропрочных и жаростойких высоколегированных сталей мартенситного, мартенситно-ферритного, ферритного, аустенито-ферритного и аустенитного классов применяются электроды поставляемые по ГОСТ 10052 – 75.

Все электроды данного класса имеют фтористо-кальциевое покрытие и позволяют выполнять сварку только на постоянном токе обратной полярности. Сварка возможна в любом пространственном положении. Электроды марки УОНИИ -13/НЖ предназначены для сварки кислотостойких, жаропрочных и маломагнитных сталей и сталей типа 2Х13, 1Х18Н9Т.

Электроды ЭА-606/11 для сварки конструкций из стали марок 456Г17Ю3, 40Г17ХН2.

Электроды ЭА-400/10У рекомендуются для сварки конструкций из коррозионно-стойких сталей марок 1Х18Н9Т, 1Х18Н12Т, Х18Н12М2Т, Х18Н12М3Т, работающих в контакте с агрессивными средами при температуре не выше 623 К.

Электроды ЭА-395/9 для сварки стали марки 1Х18Н9Т с углеродистой сталью.

3) Электроды для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами

Электроды изготавливаются и поставляются, согласно требований ГОСТ 9466 – 75 и ГОСТ 10051 – 75.

Исходя из условий работы наплавленного металла, электроды для наплавки могут, условно, разделены на группы:

- наплавленный металл низкоуглеродистый, низколегированный с высокой стойкостью в условиях трения с металлом и ударных нагрузок; (Марка ОЗН – 300М тип 11ГЗС; ОЗН-400М – 15М4С; ЦНИИН-4 – Э-65Х25М13Н3 ;

- наплавленный металл среднеуглеродистый, низколегированный с высокой стойкостью в условиях трения с металлом и ударных нагрузок при нормальной и повышенной температурах (до 650⁰С); (ОЗШ-1 – Э-16Г2ХМ; УОНИ-13/НЖ – Э-20Х13;)

- наплавленный металл углеродистый, легированный (или высоколегированный) высокой стойкости в условиях абразивной работы и ударных нагрузок;

- наплавленный металл углеродистый, высоколегированный с высокой стойкостью в условиях больших давлений и высоких температур (до 850⁰С); (ОЗИ-6 – 100Х4М8В2СФ)

- наплавленный металл высоколегированный, аустенитной структуры с высокой стойкостью в условиях коррозионной работы и трения с металлом при повышенных температурах (до 600⁰С).

В ГОСТе на эти электроды имеются данные химического состава наплавленного металла и твердость наплавленного металла.

1.3.2.3 Электроды для сварки чугуна, меди, алюминия

1) Электроды для сварки чугуна

Сварка чугуна применяется главным образом для устранения дефектов в чугунных отливках, при ремонте вышедшего из строя оборудования. Сварка может выполняться стальными электродами (УОНИ – 13/45) и чугунными электродами. Электроды для холодной сварки и наплавки чугуна не стандартизованные, поэтому их изготавливают по техническим условиям. Они

позволяют получать наплавленный металл из заданными свойствами в виде стали, сплавов на основе меди, никеля, железоникелевого сплава.

Марки электродов для сварки чугуна: ЦЧ-4 (тип наплавленного металла – сталь легированная), МНЧ-2 (сплав медно-никелевый)), ОЗЧ-2 и ОЗЧ-6 (сплав на медной основе), ОЗЖН-1 и ОЗЖН-2 (сплав железо-никелевый), ОЗЧ-3 и ОЗЧ-4 (сплав на никелевой основе).

При сварке чугунными электродами электродом служит чугунный стержень марки А или Б по ГОСТ 2671 – 80, на который наносятся различные толстые покрытия, например: Эл-д ОМЧ – 1 обмазка содержит 25% мела, 41% графита, 9% ферромарганца, 25% кварцевого песка.

2) Электроды для сварки меди

Медь имеет высокую тепло- и электропроводность и повышенную жидкотекучесть металла.

При сварке меди основная проблема - образование пор в металле шва из-за высокой ее активности при взаимодействии с газами, особенно с кислородом и водородом. Чтобы этого избежать, применяют только хорошо раскисленную медь и тщательно прокаленные электроды. Сварку выполняют по зачищенным до металлического блеска кромкам.

Сварка латуней сложна из-за интенсивного выгорания цинка.

Сварка бронз доставляет трудности ввиду высокой хрупкости и недостаточной прочности в нагретом состоянии.

Для сварки, наплавки меди и медных сплавов, сварки медных труб и прочих конструкций применяются специальные медные электроды. К данному типу относятся электроды:

Комсомолец-100, ОЗБ-2М, ОЗБ-3, АНЦ/ОЗМ-2, АНЦ/ОЗМ-3, ESAB ОК 94.25, ESAB ОК 94.35, ESAB ОК 94.55, ESAB ОК NiCu-7 (ОК 92.86), ESAB ОК Ni-1 (ОК 92.05).

Комсомолец-100 предназначен для наплавки, сварки меди марки М1-М3. Работа должна производиться на постоянном токе (о сварочных токах здесь), в нижнем или наклонном положениях. Выпускаются электроды Комсомолец-100 толщиной 3-5 миллиметров. Рекомендуемая сила тока для диаметра 3 мм 90-180

ампер, 4 мм 120-140, 5 мм 150-190. Эти показатели зависят от положения шва. Перед началом работы рекомендуется нагреть свариваемое изделие до 300-700 градусов, в зависимости от его толщины.

ОЗБ-2М предназначен и для работы с бронзой, используемой в художественном литье. Ими можно наплавлять ее на сталь, исправлять дефекты чугуна. При этом необходимо включать ток обратной полярности, производить работу в вертикальном или горизонтальном положении. *ОЗБ-2М* состоят из меди, железа, фосфора, марганца, никеля и олова. Их длина 350 мм. Для успешной работы необходимо устанавливать сварочный ток следующих значений: для диаметра 3 мм, ток 90 – 120 ампер; для диаметра 4 мм, ток 120 – 160.

ОЗБ-3 используются в работе с цветными металлами, медью и бронзой. Они делаются со специальным покрытием (узнайте тут больше о покрытиях электродов). Сварку нужно производить только в нижнем положении. Используется постоянный ток. Коэффициент и производительность наплавки *ОЗБ-3* 12,5 г/А.ч – 3,5 кг.ч при диаметре изделия 4 мм.

АНЦ/ОЗМ-2 применяется для работы с чистой медью, при этом ее нет необходимости нагревать, если она не очень толстая. Сварка должна производиться в наклонном или нижнем положениях. Используется постоянный ток обратной полярности. Расходуется *АНЦ/ОЗМ-2* 1,6 кг на то, чтобы наплавить килограмм металла.

АНЦ/ОЗМ-3 нужны для работы с изделиями из меди технических марок по ГОСТ 859-78. Они выпускаются толщиной 4-6 мм. Чтобы успешно выполнить сварку нужно настроить ток на 220-300 ампер для диаметра 4 мм, 350-400 для 5 мм, 420-600 для 6 мм. Положение шва должно быть нижнее. Работать нужно короткой дугой, с медью толщиной до 10 мм, без подогрева, без разделки кромок одно или двусторонним швом с небольшими поперечными колебаниями электрода.

ESAB OK 94.25 хорошо подходит для работы с многими цветными металлами, сплавами. Особенно с медью, оловянной бронзой, пережженным чугуном, латунью. Они могут использоваться для наплавки на сталь, для ее защиты от коррозионного воздействия. Толстые медные изделия рекомендуется

нагреть до 300 градусов. Лучше всего работать маркой ESAB ОК 94.25 в пространственных положениях 1-4.

ESAB ОК 94.35 имеет толстое рутиловое покрытие. Используется при работе с изделиями из меди и никеля, при содержании последнего до 30%. Электродом ESAB ОК 94.35 наплавляют кромки. Работать ими можно в 1-5 положениях. Наплавленный с их помощью металл наделен отличной коррозионной стойкостью, он не боится длительного воздействия морской соленой воды, наделен хорошими прочностными характеристиками.

ESAB ОК 94.55 имеют основной тип покрытия. Электрод хорош в работе с бронзой, красной латунью, медью. Сварка обычно выполняется короткой дугой. Расположение электрода должно быть перпендикулярно кромкам. Необходимо чтобы сварные валики находили один на другой.

Важно! Поверхность каждого прохода нужно не забывать зачищать от шлака.

Предел прочности 400 МПа, твердость 120 НВ. Выпускается марка ESAB ОК 94.55 диаметром 2-4 мм.

ESAB ОК NiCu-7, или ОК 92.86, используют для сварки меди и никеля. Наплавленный с их помощью металл характеризуется как устойчивый к образованию трещин, ковкий, стойкий к воздействию морской воды, кислоты и щелочи. Варят этим электродом в 1-4, 6 положениях. Выпускается данная марка толщиной 2-4 мм. В работе используется постоянный ток обратной полярности.

ESAB ОК Ni-1, ранее назывался ОК 92.05, имеет основной тип покрытия. Чтобы исключить образование трещин и пор рекомендуется работать только на допустимых для того или иного диаметра электрода токах. Подходит для 1-4, 6 положений. Прокаливают электрод два часа при температуре плюс 250 градусов. Для работы нужен постоянный ток.

3) Электроды для сварки алюминия

Состав электродов по алюминию для дуговой сварки сильно отличается в различных марках. В основу их все равно входит чистый алюминий, масса которого является подавляющей, но главные свойства определяются различными добавками, которые могут служить для сварки сплавов и так далее.

Несмотря на обилие различных электродов, используемых для соединения алюминиевых деталей, выделяются несколько марок, завоевавших наибольшую популярность:

а) *Щелочно-солевые электроды марки ОК*. Самое широкое распространение получили модели: 96.10; 96.20; 96.50 (рисунок 1.27). Данные электроды рекомендуется использовать для сварки технического алюминия и изделия из сплавов данного металла с марганцем и магнием. Электроды марки ОК характеризуются высокой гигроскопичностью, в связи с этим хранить их необходимо в местах с максимально низким уровнем влажности.

ОК 96.10 – покрытие здесь представлено щелочно-солевым типом. Это лучше всего подходит для технического металла, в котором нет примесей. Они чувствительны к понижению силы тока, так как при низких параметрах будет слишком частое залипание материалов. Скорость плавления здесь, примерно, около трех раз выше, чем у других металлов.

б) *Электроды марки ОЗАНА*. Распространенными модификациями этих электродов для алюминия являются ОЗАНА-1 и ОЗАНА-2. Первые используют, если необходимо выполнить сварку или наплавку деталей из сплавов А0-А3, вторые – для сплавов АЛ4, АЛ9, АЛ11 и др. ОЗА — СвА1, 3, 5, 10.

в) *Электроды ОЗА*. Изготавливаются из сварочной алюминиевой проволоки марок ОЗА — СвА1, 3, 5, 10. В основном используются для соединения изделий, выполненных из чистого алюминия или его сплавов с кремнием.

К примеру, марка ОЗА 1 предназначается для работы с чистым металлом и она практически на 99% состоит из него. Остальной 1% это добавки, куда входит 0,5% кремния, 0,25% титана, 0,2% железа и прочие примеси. Если же материалы предназначены для сварки алюминиево-кремниевых сплавов, то в них может содержаться около 12% кремния, а все остальное алюминий.

г) *Электроды марки УАНА*. Они нашли свое применение в сварочных работах по заготовкам из деформируемых и литейных сплавов алюминия.

Электроды для сварки дюралюминия и других сплавов подбираются под основной металл. Желательно, чтобы содержание дополнительных элементов в обоих случаях было одинаковым. Допускается присутствие небольшого

количества элементов, улучшающих свойства сваривания, примерно в сотых долях процента. Зачастую в марках указано, к каким именно сортам металла и сплава они предназначаются, так что выбор не будет сложным даже для новичков. Далее следует обратить внимание на толщину электрода, так как она не должна быть слишком большой. Из-за низкой температуры плавления всегда остается риск пропалить основной металл. Расхождение между толщиной должно составлять максимум 1 мм.



Рисунок 1.27 – Сварочные электроды ОК

1.3.2.4 Неплавящиеся электроды

1) Неплавящиеся угольные и графитовые электроды

Служат для подвода тока в зону дуги. Изготавливаются из электротехнического угля (ГОСТ 4425 – 72) или синтетического графита (ГОСТ 4426 – 71). При малой теплопроводности имеют высокую температуру плавления и кипения (3600-3800⁰С). Изготавливаются в виде стержней диаметром 5 – 25 мм, длиной 200 – 300 мм. Конец электрода затачивается на конус. Для прочности некоторые электроды омедняются. Могут быть по сечению другой формы.

Электропроводность графитовых электродов почти в 3 раза больше угольных и они обладают большей стойкостью против окисления на воздухе при больших температурах, что заметно снижает удельный расход графитовых электродов и позволяет применять повышенные плотности тока. Для

обеспечения устойчивого горения дуги «фитиль-канал» заполняется порошкообразной массой, содержащей легкоионизируемые вещества.

При сварке требуют присадочный материал или отбортовку кромок.

Угольные электроды нашли применение при сварке меди в среде азота на постоянном токе прямой полярности и при сварке углеродистых сталей в среде углекислого газа. При сварке других металлов и сплавов эти электроды не нашли применения из-за серьёзных недостатков: блуждания дуги и получения низких механических свойств металла.

Чаще применяются при резке и воздушно-дуговой строжке. 2) Вольфрамовые электроды (ГОСТ 23949-80) нашли широкое применение при сварке в среде аргона или гелия, как в стационарных, так и в монтажных условиях. Сварку ведут на постоянном или переменном токе. Для сварки в среде углекислого газа вольфрамовые электроды непригодны, так как вольфрам в этой среде интенсивно окисляется. Вольфрам является одним из самых тугоплавких металлов. Его температура плавления равна 3410°C , а кипения – 6000°C . Он имеет высокую стойкость против коррозии в воде и на воздухе, а также обладает высокой электронной эмиссией (испусканием электронов с поверхности под действием электрического поля). Последнее способствует устойчивому горению дуги при сварке. При нагревании вольфрам окисляется, особенно интенсивно – начиная с температуры 500°C , с образованием трёхокси, температура возгонки которой составляет 850°C (возгонка или сублимация – непосредственный переход из твёрдого состояния в газообразное без образования жидкости).

3) Условия применения

При сварке вольфрам применяют в качестве неплавящегося электрода только в неокислительной среде (Ar, He, вакуум), а также в среде азота, с которым вольфрам не реагирует даже при очень высоких температурах.

Для улучшения горения дуги (стабильности процесса) вольфрамовый электрод затачивают определённым образом. При использовании чистого вольфрама заострённый конец электрода быстро теряет свою форму, вследствие чего нарушается стабильность сварочного процесса и снижается качество сварных швов. Недостаточную стойкость устраняют нанесением на него

покрытия из окиси тория в процессе сварки методом периодических погружений раскалённого конца электрода в порошкообразную окись тория.

В настоящее время промышленность выпускает специальные вольфрамовые электроды:

- легированные окисью лантана (ЭВЛ – (1,1...1,4)%);

- окисью иттрия (ЭВИ-1 – (1,5...2,3)%, ЭВИ-2 – (2,0...3,0)%, ЭВИ-3 – (2,5...3,5)%);

- легированные двуокисью тория (1,5...2,0)%.

Легированные электроды при сварке на постоянном токе прямой полярности имеют следующие преимущества:

- они более тугоплавки и допускают повышенные режимы сварки;

- расход таких электродов меньше, чем электродов из чистого вольфрама (так, расход электродов марок ЭВЧ – 8,4 г/ч, ЭВЛ – 1,2 г/ч, ЭВИ – 0,18 г/ч и ЭВТ – 1,4 г/ч);

- намного дольше сохраняют форму заточки, что важно, при механизированной сварке тонколистового материала;

- обладают повышенной электронной эмиссией, вследствие чего дуга легко возбуждается при меньшем напряжении холостого хода источника питания.

Маркировка: ЭВЧ не маркируют. ЭВЛ – чёрный. ЭВИ-1 – синий. ЭВИ-2 – фиолетовый. ЭВИ-3 – зелёный. ЭВТ-15 – красный. При сварке на переменном токе легированные электроды существенных преимуществ не имеют (таблица 1.5).

4) Поставка, хранение

Упакованные электроды транспортируют всеми видами транспорта в крытых транспортных средствах. При транспортировке укладка ящиков должна предупреждать их перемещения, механические повреждения упаковки и электродов, попадание влаги.

Хранить электроды следует в упаковке, выполненной следующим образом: коробки с электродами упакованы в дощатые ящики, выложенные внутри упаковочной водонепроницаемой бумагой. Оставшийся свободный объём ящика

плотно заполняют упаковочной бумагой или ватой. Не допускаются механические повреждения упаковки и электродов, попадание влаги.

Таблица 1.5 – Максимальные значения тока для вольфрамовых электродов, А

Диаметр электрода мм	Полярность постоянного тока,						Переменный ток		
	прямая			обратная					
	ЭВЛ	ЭВИ	ЭВТ	ЭВЛ	ЭВИ	ЭВТ	ЭВЧ	ЭВЛ	ЭВИ
2	80	180	120	20	25	25	-	-	-
3	230	380	300	35	50	30	-	150	180
4	500	620	590	60	70	60	180	170	220
5	720	920	810	-	-	70	-	210	270
6	900	1500	1000	100	120	110	250	250	340
8	-	-	-	150	180	160	360	380	480
10	-	-	-	190	250	220	450	520	650

5) Испытание электродов

Геометрические размеры, равномерность диаметра по длине и овальность электродов проверяют микрометром или штангенциркулем, длину – линейкой.

Качество поверхности электродов проверяют визуально. При разногласии в оценке качества применяют оптические средства и мерительный инструмент.

Прямолинейность электродов проверяют с помощью щупа на ровной металлической плите.

Проверку отсутствия внутренних расслоений и трещин проводят с помощью токовихревого дефектоскопа.

1.3.3 Сварочные флюсы

1) Назначение флюсов. Флюсы (ГОСТ 9087-81) применяют для защиты и формирования шва при автоматической сварке плавящимся электродом.

К флюсам для автоматической дуговой сварки предъявляются многочисленные и разнообразные требования. Флюс должен обеспечить:

- хорошее формирование наплавленного металла и сварного шва при высокой производительности сварки;
- надлежащие химический состав, структуру и высокую прочность наплавленного металла;
- плотные швы, не склонные к образованию пор и трещин;
- защиту зоны сварки от атмосферного воздуха;
- устойчивость горения дуги;
- лёгкую отделяемость шлаковой корки после остывания;
- наименьшее выделение пыли и вредных для здоровья сварщика газов;
- достаточную механическую прочность зёрен, допускающую многократную подачу флюса к месту сварки и уборку не расплавившейся части флюса без чрезмерного дробления зёрен и образования большого количества пыли, снижающей качество сварки.

Кроме этого, возникает ряд дополнительных условий при использовании флюсов для сварки:

- плотность шлака должна быть ниже плотности металла сварочной ванны, чтобы обеспечить его всплывание;
- шлак должен покрывать шов по всей поверхности ровным слоем;
- флюс не должен быть гигроскопичным.

2) Классификация флюсов

По назначению, в зависимости от преимущественного применения, флюсы делятся на три группы:

- для сварки углеродистых и легированных сталей;
- для сварки высоколегированных сталей;
- для сварки цветных металлов и сплавов.

В отдельных случаях флюсы, предназначенные для сварки металлов одной группы, могут быть применены для сварки металлов другой.

По химическому составу различают флюсы оксидные, солевые и солеоксидные.

Оксидные флюсы состоят из оксидов металлов и могут содержать до 10 % фтористых соединений. Их применяют для сварки углеродистых и низколегированных сталей.

Солевые флюсы состоят из фтористых и хлористых солей металлов и других, не содержащих кислород химических соединений. Они используются для сварки активных металлов и шлакового переплава.

Солеоксидные флюсы состоят из фторидов и оксидов металлов. Применяются для сварки легированных сталей.

По химическим свойствам оксидные флюсы, в зависимости от соотношения масс, входящих в них кислых и основных оксидов, подразделяются на кислые, основные и нейтральные.

К кислым оксидам относятся SiO_2 и TiO_2 ; к основным – CaO , MgO , MnO , FeO . Фториды и хлориды – химически нейтральные соединения.

Флюсы, в зависимости от содержания в них SiO_2 и MnO , различают: высококремнистые (37 – 40 % SiO_2), низкокремнистые (до 35 % SiO_2), безкремнистые (SiO_2 не более 4%), (безмарганцевые (не более 1,0 % MnO), марганцевые (более 1 % MnO).

По степени легирования металла шва различают флюсы:

- пассивные, практически не вступающие во взаимодействие с расплавленным металлом;

- активные, которые могут быть слабо легирующими (например, плавные флюсы) и сильно легирующими (большинство керамических флюсов).

По способу изготовления флюсы делятся на плавные и неплавные.

- *Плавные флюсы* получают путем сплавления в электрических или пламенных печах шихты определенного состава с последующей обработкой для получения крупинки требуемого размера.

- *Неплавные флюсы* изготавливаются без расплавления шихты. К ним относятся:

- флюсы, получаемые путём измельчения минералов, как например БКФ-1, состоящий только из крупинки плавикового шпата;

- флюсы, получаемые путём смешивания крупинок нескольких материалов. Эти флюсы просты в изготовлении, но, в связи с наличием в них материалов с различной удельной плотностью, при транспортировке и в процессе сварки происходит их сепарация, что меняет степень легирования отдельных участков наплавки или шва (что крайне нежелательно);

- керамические флюсы, предложенные академиком К. К. Хреновым; они представляют собой механическую смесь тонко измельчённых компонентов, сцементированных жидким стеклом и гранулированных на крупинки определенных размеров; керамические флюсы, шихтуемые из фтористых и хлористых солей, обладают свойствами самоспекания и изготавливаются без цементирующей добавки (жидкого стекла). Составные части флюса тонко измельчаются, смешиваются в нужных соотношениях и замешиваются на водном растворе жидкого стекла в густую пасту. Сырая масса гранулируется (размер зерна (1...3) мм), затем подсушивается и прокаливается для удаления влаги и повышения механической прочности зёрен. Средний насыпной вес керамических флюсов около 1,0 г/см³. Каждое зерно керамического флюса состоит из многих тысяч мелких частиц, прочно скреплённых между собой.

Для создания шлака в состав керамического флюса вводят минеральные вещества. Для газовой защиты зоны сварки вводят карбонат кальция в виде мрамора, разлагающийся при высокой температуре с образованием углекислого газа. В процессе сварки особенно важно раскисление металла. Для этой цели в керамические флюсы вводят раскислители: металлический титан, кремний, иногда – алюминий. При этом часто удаётся удалить большую часть серы, снизив её содержание до тысячных долей процента, для чего шлаку придаётся основной характер за счёт повышения в нём оксида кальция СаО.

Введение в состав керамических флюсов ферросплавов позволяет легировать наплавленный металл через флюс и применять при сварке дешёвую сварочную проволоку Св-08, сокращая потребление дорогостоящей легированной. Легирование возможно осуществлять всеми элементами, в том числе и углеродом. Керамические флюсы позволяют модифицировать металл шва и улучшать его структуру. Модификацией уничтожается дендритная структура.

Уже в процессе первичной кристаллизации металл затвердевает с образованием равноосных мелких зёрен. Для модификации пригодны мельчайшие включения, служащие центрами кристаллизации, и поверхностно-активные вещества, меняющие поверхностное натяжение металла. Необходимые для модификации элементы вводят в состав флюсов.

Преимуществом керамических флюсов для сварки низкоуглеродистых сталей является малая чувствительность к ржавчине и различным загрязнениям поверхности металла, что позволяет снизить требования к очистке поверхности, проводить сварку на открытом воздухе в сырую погоду.

Керамические флюсы не имеют тех основных недостатков, которые присущи обычным неплавленым флюсам. Механически прочные зёрна обеспечивают достаточную газопроницаемость слоя флюса и не выдуваются газами дуги. Прочное склеивание частиц устраняет возможность сепарации и сегрегации отдельных зёрен и изменения состава флюса при подаче в зону сварки и уборке, что является одним из недостатков неплавленных флюсов. Тонкое измельчение составных частей обеспечивает полное расплавление и протекание металлургических реакций.

К недостаткам керамических флюсов, по сравнению с плавлеными, относятся меньшая механическая прочность и большая гигроскопичность.

По строению крупинок (зёрен) флюсы делятся на стекловидные, пемзовидные и цементированные.

-Стекловидный плавленный флюс представляет собой прозрачные зёрна, окрашенные в зависимости от состава флюса в различные тона: от светло-синего до тёмно-бурого. Для получения его жидкий флюс при температуре (1200...1250) °С тонкой струёй льют в бак с проточной водой. Плотность такого флюса (1,2..1,6) г/см³.

-Пемзовидный плавленный флюс представляет собой крупинки пенистого материала различных оттенков. Для получения его расплав, нагретый до (1550...1600) °С, выливают в стоячую воду. При этом пары воды вспенивают расплавленную массу, образуя пемзовидный флюс, плотность которого менее 1,0 г/см³.

Стекловидный флюс обеспечивает лучшую, чем пемзовидный, защиту зоны сварки. Но более качественное формирование шва наблюдается при применении пемзовидного флюса.

-Цементированный флюс представляет собой неплавленый керамический флюс.

По характеру зависимости вязкости шлаков от температуры различают флюсы, образующие шлаки с различными физическими свойствами.

Флюсы-шлаки, вязкость шлаков которых с понижением температуры возрастает медленно, называют «длинными». А флюсы-шлаки, вязкость шлаков которых с понижением температуры возрастает быстро, называют «короткими». Преимущественное применение находят флюсы с «короткими» шлаками, какими являются основные флюсы.

Плотность шлака должна быть ниже плотности металла сварочной ванны, чтобы обеспечить его всплывание. Температурный интервал затвердевания шлака должен быть ниже температуры кристаллизации металла шва, иначе шлак не будет пропускать выделяющиеся газы.

3) Характеристика и область применения наиболее распространенных флюсов.

При сварке под флюсом состав флюса полностью определяет состав шлака и атмосферу дуги, а взаимодействие жидкого шлака с расплавленным металлом сварочной ванны оказывает существенное влияние на химический состав, структуру и свойства шва.

Применительно к углеродистым сталям качественный шов можно получить при следующем сочетании флюсов и сварочной проволоки:

- плавленый марганцевый, высококремнистый флюс и низкоуглеродистая или марганцовистая проволока;
- плавленый безмарганцевый, высококремнистый флюс и низкоуглеродистая марганцовистая проволока;
- керамический флюс и низкоуглеродистая проволока.

При сварке углеродистых и низколегированных конструкционных сталей чаще всего используется углеродистая проволока марок Св-08 и Св-08А в

сочетании с высококремнистым марганцевым флюсом марок: ОСЦ-45, АН-348А, ОСЦ-45М и АН-348АМ (*М* – мелкий). Флюсы марок ОСЦ-45 и АН-348А с размерами зерна (0,35...3,0) мм предназначены для автоматической сварки сварочной проволокой диаметром 3,0 мм и более. Флюсы марок ОСЦ-45М и АН-348АМ с размерами зерна (0,25...1,6) мм применяют для автоматической и полуавтоматической сварки проволокой диаметром менее 3,0 мм.

Шихта флюса марки ОСЦ-45 состоит из марганцевой руды, кварцевого песка, плавикового шпата с добавками MgO , CaO , Al_2O_3 и Fe_2O_3 . Флюс малочувствителен к ржавчине, даёт плотные швы, стойкие против образования горячих трещин. Недостатком флюса является большое выделение вредных фтористых газов.

Шихта флюса АН-348А состоит из марганцевой руды, плавикового шпата (его меньше, чем во флюсе ОСЦ-45) кварцевого песка, каустического магнезита с добавками CaO , Al_2O_3 и Fe_2O_3 . Он более чувствителен к ржавчине, чем флюс ОСЦ-45, но выделяет меньше вредных фтористых газов.

При сварке высоколегированных сталей необходимо избегать окисления легирующих примесей, вводимых в металл шва из основного металла и сварочной проволоки. Поэтому обычно применяемые для сварки низколегированных сталей плавленные флюсы при сварке высоколегированных сталей непригодны, так как содержащиеся в них в большом количестве оксиды марганца и кремния при сварке окисляют хром, титан и другие легирующие элементы. В результате снижается коррозионная устойчивость и сопротивление образованию горячих трещин металла шва. Кроме того, большое количество оксидов (FeO , MnO , SiO_2 , TiO_2) в жидком шлаке окисляет тонкий верхний слой затвердевшего шва, и эта плёнка оксидов прочно сцепляется с оксидами застывшего шва, что затрудняет удаление корки шлака с поверхности шва. Поэтому для сварки высоколегированных сталей применяют пассивные по химическим свойствам основные флюсы, не содержащие или содержащие очень мало оксида марганца и кремнезёма.

Так, флюсы АН-20С, АН-20СМ и АН-20П служат для дуговой автоматической наплавки высоколегированных сталей и сварки легированных

сталей соответствующей сварочной проволокой. Флюс АН-22 предназначен для электрошлаковой сварки и дуговой автоматической наплавки легированных сталей легированной сварочной проволокой. Флюсы АН-26, АН-26СП и АН-26П применяют для автоматической и полуавтоматической сварки нержавеющей, коррозионностойких и жаропрочных сталей.

Флюсы, маркируемые буквами АН, разработаны институтом им. Патона (г. Киев), а флюсы, маркируемые ОСЦ и ФЦ, разработаны ЦНИИТмашем (г. Москва). Области применения отдельных марок флюсов приведены в таблице 1.6 и 1.7.

Таблица 1.6 - Области применения плавящихся флюсов

Марка флюса	Свариваемые стали	Марка электродной проволоки	Назначение флюса
1	2	3	4
АН-1	Малоуглеродистые	Св-08ГС	Для автоматической сварки кольцевых и угловых швов небольшого сечения всех типов соединений
ГАЗ-1	Сталь хромансиль	Св-08Г2С	Для сварки с большой скоростью кольцевых швов на цилиндрических изделиях малых диаметров
ФЦ-1	Малоуглеродистые	Св-08ГС, Св-08Г2С	Для автоматической сварки кольцевых швов цилиндрических изделий диаметром ≥ 120 мм
ОСЦ-45	Малоуглеродистые и низколегированные	Св-08, Св-08А	Для автоматической сварки всех типов соединений, за исключением кольцевых швов малого диаметра
АН-348А	Малоуглеродистые и низколегированные	Св-08А	Для автоматической и полуавтоматической шланговой сварки всех типов соединений, за исключением кольцевых швов малого диаметра
ОСЦ-45М	Малоуглеродистые и низколегированные	Св-08А	Для полуавтоматической сварки всех типов соединений
АН-51	Малоуглеродистые и низколегированные	Св-08А	Для полуавтоматической шланговой сварки всех типов соединений
ФЦ-7	Малоуглеродистые и низколегированные	Св-08А, Св-08, Св-10Н М	Для автоматической многопроходной сварки трехфазной дугой
АН-60	Малоуглеродистые	Св-08	Для автоматической двухдуговой сварки на больших скоростях
ФЦЛ-1	Аустенитные, хромоникелевые, а также ферритные и полуферритные хромистые	Св-08, Св-08А	Для автоматической и полуавтоматической шланговой сварки

Продолжение таблицы 1.6

1	2	3	4
АН-26	Аустенитные, хромоникелевые, а также ферритные и полуферритные хромистые	Св-08, Св-08А	Для автоматической и полуавтоматической шланговой сварки
АН-20	Легированные стали и медь	Легированная или порошковая проволока	Для автоматической и полуавтоматической сварки или наплавки
АН-22	Малоуглеродистые и низколегированные	Св-08, Св-08А	Для автоматической электрошлаковой сварки вертикальных стыковых швов с принудительным формированием
АН-30	Высокоуглеродистые, высокохромистые, а также быстрорежущие	Порошковая проволока: ПП-Х12ВФ, ПП-3Х2В8, ПП-Р9, ПП-Р18	Для автоматической и полуавтоматической наплавки

Таблица 1.7 – Области применения некоторых керамических флюсов

Марка флюса	Свариваемые стали	Марка проволоки	Характеристика
1	2	3	4
КС-1	Малоуглеродистые	Св-08	Является основой некоторых специальных флюсов. Энергично раскисляет, обессеривает и улучшает структуру наплавленного металла
КС-2	Малоуглеродистые, низколегированные	Св-08	Весьма устойчив против образования пор и трещин даже при больших скоростях сварки
КВС-19	Малоуглеродистые, низколегированные стали	Св-08	Разработан специально для автоматической и полуавтоматической сварки стыков магистральных трубопроводов
КС-30ХГСНА	Сталь марки 30ХГСНА	Св-08	Наплавленный металл по химическому составу и структуре близок к основному металлу (после термообработки)
КС-3Х2В8	Наплавка на штампах, ножах гильотин	Св-08	Наплавленный металл содержит (%): С – (0,25...0,30); Cr – (1,8...2,2); W – (7,8...8,5); Ti – (0,1...0,15)
КС-С	Наплавка на детали, подверженные абразивному износу	Св-08	Наплавленный металл обладает высокой твёрдостью. Заменяет дорогой сплав Сормайт №1

1.3.4 Защитные газы

1.3.4.1 Общие сведения о защитных газах

Важное место в решении качества сварных конструкции является применение газов для защиты расплавленного металла шва от вредных примесей атмосферы.

Газы, применяемые для защиты зоны сварки это: активные - CO_2 , водород, азот, кислород ; инертные – аргон и гелий.

Газы применяются для сварки конструкционных сталей малоуглеродистых и низколегированных, легированных и высоколегированных; алюминия и его сплавов, титана и его сплавов, меди и ее сплавов

Назначение:

- защита сварочной ванны от воздуха;- обеспечение возможности протекания физико-химических реакций, которые способствуют уменьшению и удалению из сварочной ванны вредных примесей кислорода, азота и водорода;

- обеспечение возможности протекания физико-химических реакций, которые способствуют уменьшению и удалению из сварочной ванны вредных примесей кислорода, азота и водорода.

- обеспечение возможности протекания физико-химических реакций, которые способствуют уменьшению и удалению из сварочной ванны вредных примесей кислорода, азота и водорода.

1.3.4.2 Классификация защитных газов

1) Инертные газы

Аргон в газообразном состоянии не имеет цвета и запаха. Плотность при плюс 20°C равна $1,662 \text{ кг/м}^3$. Температура кипения $T_{\text{кип.}}$ при атмосферном давлении (-185°C).

Аргон значительно тяжелее воздуха (на 38%), поэтому он с легкостью вытесняет воздух из зоны выполнения сварочных работ и создает ее надежную защиту. Являясь инертным по своей природе, аргон практически не реагирует с расплавленным металлом, а также другими газами, присутствующими в зоне, где горит сварочная дуга.

Аргон получают разделением воздуха методом низкотемпературной ректификации. Также получают с помощью установок по извлечению аргона из отдувочных газов аммиачного производства.

Аргон можно доставлять потребителям в газообразном виде в 40 – литровых баллонах под давлением 15 МПа. Баллон с чистым аргонem окрашивается краской серого цвета и маркируется зеленой надписью «Аргон».

Можно поставлять в сжиженном виде в специальных емкостях.

Экономически оправдано снабжение предприятий газообразным аргонem в баллонах, т.к. его годовое потребление в пределах 10 000м³ и сравнительно небольшие расстояния доставки.

Запас аргона у потребителя зависит от расстояния до поставщика. Если это расстояние менее 100 км, то достаточно двухсуточного запаса; 100 – 1000км - запас 4-6 суток и т.д. Объем хранилища должен быть больше транспортной цистерны.

Внутризаводское транспортирование аргона по цехам должно обеспечиваться по трубопроводам.

Гелий – защитный газ для сварки легированных сталей, цветных и тугоплавких металлов. Применяется меньше т.к. более дорогой и дефицитный.

Гелий добывается из природного газа процессом низкотемпературного разделения — так называемой фракционной перегонкой.

По действующим стандартам отечественный гелий выпускается двух сортов: технический продукт, содержащий не менее 99,80% He, и продукт высокой чистоты, в котором гелия не менее 99,985%. В гелии высокой чистоты допустимы примеси H₂, N₂ и углеводородов в пределах (2—5)-10~3%.

На заводах имеются надземные хранилища гелия. Обычно это толстостенные стальные трубы диаметром 250—270 мм и длиной 24,5 и 80 м, расположенные на бетонных опорах. Здесь гелий хранится под давлением 12,5— 14,0 МПа. Заводские хранилища служат временными приемниками продукции при перерывах в подаче на завод транспортных емкостей. Подземное хранение гелия во много раз дешевле надземного и может осуществляться многие годы без существенных, утечек.

По трубопроводам гелий передают в редких случаях. Обычно он поступает к потребителям в специальных и обыкновенных баллонах для сжатых газов. Все шире практикуется перевозка гелия на дальние расстояния в жидком виде.

Гелий хранят и перевозят в газообразном виде в 40 литровых баллонах при давлении 15 МПа. Полностью заправленный баллон содержит 5700 л гелия. Диаметр баллона 219 мм, высота баллона 1370 мм. Вес баллона из легированной стали - 57 кг; вес баллона из углеродистой стали - 64 кг. Баллоны окрашены в коричневый цвет и имеют надпись белыми буквами.

Безбаллонные транспортировка и хранение не применяют, т.к. гелий имеет низкую температуру сжижения (минус 269⁰С).

При использовании гелия при сварке плавящимся и неплавящимся электродом характерны высокая устойчивость дуги, повышенная (по сравнению с аргоном) глубина проплавления основного металла, благоприятная форма проплавления.

В ряде случаев эффективно применение смесь аргона и гелия. Состав их находится в пределах $Ar\ 25 - 75\ \% + 75 - 25\ \% He$. При сварке алюминия и высоколегированных сталей эффективно: $35\% Ar + 65\% He$.

Для сварки углеродистых и низколегированных сталей эти газы не применяются в связи с повышенной склонностью этих швов к образованию пор.

Для сварки меди и ее сплавов применяют азот или смесь азота с аргоном.

2) Активные газы при сварке вступают в химические реакции с жидким металлом. При этом происходят реакции окисления, раскисления, рафинирования дегазации металла.

Двуокись углерода (углекислый газ).

CO₂ – бесцветный, со слабым кислым запахом, хорошо растворяется в воде. Плотность при нормальных условиях 1,96 кг/м³;

Сварка в CO₂ – началась в 50 – х годах. Уровень механизации сварочных работ увеличился в 1,5 – 2,5 раза. Поставляется по ГОСТ 8050 – 85.

В промышленности наиболее распространены 3 способа получения углекислого газа:

- из отходящих газов химических производств, прежде всего синтетического аммиака и метанола; в отходящем газе содержится примерно 90% углекислого газа;

- из дымовых газов промышленных котельных, сжигающих природный газ, уголь и другое топливо; в дымовом газе содержится 12–20% углекислого газа;

- из отходящих газов, образующихся при брожении в процессе получения пива, спирта, при расщеплении жиров; отходящий газ представляет собой почти чистый углекислый газ.

Согласно ГОСТ 8050-85 газообразная и жидкая углекислота поставляется трех видов: высшего, первого и второго сортов. Для сварки рекомендуется использовать углекислоту высшего и первого сорта. Применение углекислоты второго сорта для сварки допускается, однако желательно наличие осушителей газа. Хранение и транспортировка двуокиси углерода выполняется в баллонах и цистернах (рисунок 1.28).

Применение углекислого газа при сварке

Углекислый газ применяется в качестве активного защитного газа при дуговой сварке (обычно при полуавтоматической сварке) плавящимся электродом (проволокой), в том числе в составе газовой смеси (с кислородом, аргоном).

Снабжение сварочных постов углекислым газом может осуществляться следующими способами:

- непосредственно от автономной станции по производству углекислоты;
- от стационарного сосуда-накопителя – при значительных объемах потребления углекислого газа и отсутствии у предприятия собственной автономной станции;
- от транспортной углекислотной емкости – при меньших объемах потребления углекислого газа;
- от баллонов – при незначительных объемах применения углекислого газа или невозможности прокладки трубопроводов к сварочному посту.

Недостатки:

- повышенное разбрызгивание электродного металла (10 – 12%);

- зачистка околошовной зоны от брызг;
- узкое и глубокое проплавление основного металла при сварке на больших токах;



Рисунок 1.28 - Хранение и транспортировка двуокиси углерода

- возможность возникновения кристаллизационных трещин и пор;
- не всегда удовлетворительные механические свойства металла шва (особенно ударная вязкость при отрицательных температурах);
- неровности и грубая чешуйчатость шва.

Сварка выполняется на постоянном токе обратной полярности (на прямой полярности еще более разбрызгивание и плохое формирование шва).

При сварке сталей эффективно применять смеси: $\text{Ar} + 20\text{-}30\% \text{CO}_2$;

$\text{Ar} + (3\text{-}7\%)\text{O}_2 + 20\text{-}30\% \text{CO}_2$; и др.

Смесь $\text{CO}_2 + 20\text{-}30\% \text{O}_2$ по сравнению с CO_2 при сварке плавящимся электродом обеспечивает более высокую стойкость сварных швов против образования водородных пор и кристаллизационных трещин.

Проволоки : Св-08Г2С. Св-08ГС – обеспечивают плотные швы с высокими механическими свойствами, особенно по ударной вязкости при отрицательных температурах.

Меры безопасности при работе с углекислым газом

Углекислота не токсична и не взрывоопасна, однако при ее концентрациях в воздухе свыше 5% (92 г/м^3) снижается доля кислорода, что может привести к кислородной недостаточности и удушью. Поэтому следует опасаться ее скапливания в плохо проветриваемых помещениях. Для регистрации концентрации углекислоты в воздухе производственных помещений применяются газоанализаторы – стационарные автоматические или переносные.

При уменьшении давления до атмосферного жидкая углекислота превращается в газ и снег с температурой минус $78,5^\circ\text{C}$ и может привести к поражению слизистой оболочки глаз и обморожению кожи. Поэтому при отборе проб жидкой углекислоты необходимо пользоваться защитными очками и перчатками.

Осмотр внутренней емкости ранее эксплуатируемой цистерны для хранения и транспортирования жидкой углекислоты необходимо проводить в шланговом противогазе. Цистерну необходимо отогреть до температуры окружающей среды, а внутреннюю емкость продуть воздухом или провентилировать. Противогаз разрешается не использовать только после того, как объемная доля углекислоты внутри оборудования станет ниже 0,5%.

Азот – газ без цвета и запаха; плотностью $1,25046\text{ кг/м}^3$ при 0°C и давлении $101,3\text{ кПа}$. Удельный объем газообразного азота равен $860,4\text{ дм}^3/\text{кг}$. Жидкий азот – бесцветная жидкость. При температуре минус 196°C превращается в жидкость.

Азот жидкий и газообразный получают из атмосферного воздуха способом глубокого охлаждения. Газообразный азот предназначается для создания инертной атмосферы при производстве, хранении и транспортировке легко окисляемых продуктов, при высокотемпературных процессах обработки металлов, не взаимодействующих с азотом, для консервации замкнутых металлических сосудов и трубопроводов, для других целей.

Дальнейшее развитие способа аргоно-дуговой сварки привело к предложению применить в качестве защитного газа азот. Вначале азотно-дуговая сварка была использована для соединения нержавеющей стали типа 18-8. Азотно-

дуговая сварка может быть успешно применена для соединения меди и ее сплавов, серебра и его сплавов и некоторых других материалов.

Возможность использовать азот для защиты дуги при сварке меди основывается на том, что азот практически не образует с медью химических соединений или твердых растворов, ведущих к изменению свойств меди.

Азотно-дуговую сварку меди рекомендуется производить на постоянном токе прямой полярности, в качестве электродов применять торированные вольфрамовые прутки.

При одинаковых диаметрах вольфрамового электрода и сопла горелки давление азота должно быть выше давления аргона при аргоно-дуговой сварке примерно в полтора раза. Без применения раскислителей при азотно-дуговой, как и при аргоно-дуговой сварке, добиться высокого качества сварных соединений меди не удалось. Поэтому при азотно-дуговой сварке они применяли раскислители в виде смесей из древесного угля, феррофосфора, алюминиевого порошка, ферросилиция и ферромарганца.

Хранение и транспортировка

Как правило, транспортировка и хранение азота осуществляется посредством баллонов.

Баллоны выполняются из черной стали и имеют маркировку желтого цвета. Производить транспортировку и хранение азота следует с соблюдением всех необходимых мер предосторожности.

По сути, газ не является взрывчатым веществом. Однако нужно учитывать, что в баллонах он находится в сжатом состоянии. Если неправильно осуществлять транспортировку и хранение, то азот может создать аварийную ситуацию. В связи с этим, следует соблюдать осторожность, не подвергать баллоны ударам, падениям, перегреву. Если этого не выполнять, то произойдет разгерметизация, которая может привести к взрыву резервуара.

Водород. При нормальных условиях безвкусен, бесцветен, и абсолютно без запаха. При попадании в термосферу улетает в космос из-за малого веса.

Во всей вселенной это самый многочисленный химический элемент (75% от всей массы веществ). Настолько, что многие звезды в космическом пространстве состоят полностью из него.

ГОСТ3022 – 80 предусматривает четыре марки технического водорода:

А – 99,8% водорода;

Б – 98% водорода;

В – (первого сорта) – 98,5% водорода, (второго сорта) – 97,5% Н;

Г – (первого сорта) – 97,5% Н, (второго сорта) – 95% Н;

Применение

При использовании водородной сварки под действием высокой температуры происходит диссоциация молекул водорода. При дальнейшей рекомбинации атомарного водорода в двухатомный высвобождается энергия диссоциации, как дополнительная теплота, что ускоряет процесс сварки. Защита зоны сварки водородом обеспечивает высокое качество шва почти для всех металлов (кроме меди и его сплавов). Зазор между сварными кромками заполняется присадочным металлом.

Атомноводная сварка применяется для образования герметичных и высокопрочных швов. Вследствие того, что в результате горения выделяется водяной пар, этот вид сварки считается наиболее безопасным, тем не менее применение атомно-водородной сварки ограничено, так как источники питания должны иметь высокое напряжение — около 250—300 В, что опасно для жизни человека; процесс этой сварки трудно поддается механизации.

Электрическая дуга поддерживается независимо от заготовки или свариваемых деталей. В качестве газообразного водорода применяется обычно двухатомные молекулы (H_2). При температуре вблизи дуги свыше 600 °С водород распадается к атомарной форме, одновременно поглощая большое количество тепла от дуги. Когда атомы водорода ударяют относительно холодную поверхность (зону сварного шва), происходит рекомбинация водорода к его двухатомной форме с высвобождением энергии, связанной с формированием этой связи.

Хранение и транспортировка

На сегодняшний день реализованы различные методы хранения водорода. Это не является более сложной проблемой, чем хранение природного газа. На практике для этого применяют газгольдеры, естественные подземные резервуары, хранилища, созданные подземными атомными взрывами. Доказана принципиальная возможность хранения газообразного водорода в соляных кавернах, создаваемых путём растворения соли водой через буровые скважины. Для хранения газообразного водорода при давлении до 100 МПа используют сварные сосуды с двух- или многослойными стенками. Внутренняя стенка такого сосуда выполнена из аустенитной нержавеющей стали или другого материала, совместимого с водородом в условиях высокого давления, внешние слои – из высокопрочных сталей.

Для этих целей применяют и бесшовные толстостенные сосуды из низкоуглеродистых сталей, рассчитанных на давление до 40–70 МПа. Одним из наиболее перспективных способов хранения больших количеств водорода является хранение его в водоносных горизонтах. Годовые потери составляют при таком способе хранения 1 – 3%. Эту величину потерь подтверждает опыт хранения природного газа. Газообразный водород возможно хранить и перевозить в стальных сосудах под давлением до 20 МПа. Такие ёмкости можно подвозить к месту потребления на автомобильных или железнодорожных платформах, как в стандартной таре, так и в специально сконструированных контейнерах. Баллоны для хранения водорода достаточно просты и компактны.

Большие количества водорода можно хранить в крупных газгольдерах под давлением. Газгольдеры обычно изготавливают из углеродистой стали. Рабочее давление в них обычно не превышает 10 МПа.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Сплошная сварочная проволока, ГОСТ. Виды сварочной и наплавочной проволоки. Порошковая проволока и лента.
- 2) Определение и классификация электродов. ГОСТ. Типы электродов и их буквенно-цифровое обозначение.
- 3) Назначение электродного покрытия.

4) Составляющие обмазки. Типы электродных покрытий.

5) Неплавящиеся электроды.

6) Флюсы. Классификация сварочных флюсов и требования к ним. ГОСТ.

Технология изготовления флюсов.

7) Газы, применяемые при электрической сварке плавлением

Литература: [2], [5, глава 4]

1.4 Формирование и кристаллизация металла шва

1.4.1 Особенности металлургических процессов при сварке

Металлургическими называются процессы связанные с нагревом, расплавлением и охлаждением металла.

Металлургические процессы сварки характеризуются следующими особенностями:

- малый объем расплавленного металла;
- высокая температура в зоне сварки ($6000 - 7000^{\circ}\text{C}$);
- кратковременность процесса сварки;
- сварка процесс движущийся сопровождающийся изменением температурного режима;
- высокие скорости охлаждения и кристаллизации наплавленного металла;
- сварка открытый металлургический процесс, поэтому между расплавленным металлом ванны и окружающей средой происходит интенсивное взаимодействие (химические реакции). В металлургическом процессе сварки активное участие принимают: основной и электродный металл, материал обмазки электродов и флюсы.

Металлургические процессы, протекающие в сварочной ванне.

Сварочная ванна образуется в результате расплавления и перемешивания металла заготовок, металла электрода (и присадочного материала). Сварочная ванна в своей передней части контактирует с газовой атмосферой дуги; в хвостовой части контактирует со слоем расплавленного шлака; по бокам контактирует с холодным твердым металлом заготовок.

Химический состав сварочной ванны определяется составом электрода (присадочного материала) и металлом заготовок. Конечный состав шва устанавливается после протекания металлургических процессов в каплях расплавленного металла и в сварочной ванне. Особенность протекания металлургических процессов при дуговой сварке заключается в высокой скорости их протекания и кратковременностью существования сварочной ванны. Металлургические процессы, протекающие в сварочной ванне условно можно разделить на три вида: взаимодействие расплава с газовой фазой; взаимодействие расплава и шлака; кристаллизация расплава.

Взаимодействие расплавленного металла с газовой фазой определяется составом газовой атмосферы дуги, около дугового пространства и химическими свойствами элементов, содержащихся в расплавленном металле. Атмосфера дуги и около дугового пространства содержит смесь следующих газов: кислород, водород, азот, CO, CO₂; паров: воды, металлов и шлаков. Количественное соотношение газов зависит от вида сварки, способа защиты сварочной ванны. При высоких температурах дуги газы диссоциируют и переходят в атомарное состояние. При этом возрастает их химическая активность и способность к растворению в расплаве металлов. Кислород, водород, азот попадают в зону дуги из воздуха; сварочной проволоки; покрытий электродов; флюсов и защитных газов. Дополнительным их источником могут служить: ржавчина, оксидные пленки, органические загрязнения и конденсат на поверхностях заготовок.

Кислород, взаимодействуя с расплавом, окисляет металлы, образуя оксиды. Оксид железа растворяется в металле шва и окисляет примеси и легирующие элементы, обладающие большим химическим сродством к кислороду (кремний, марганец, титан, хром, алюминий). Полученные оксиды нерастворимы в железе, и, обычно, переходят в шлак (но, частично, они могут остаться в сварном шве в виде неметаллических включений).

Водород хорошо растворяется в расплавленном металле, и плохо растворим в твердых фазах металла. Поэтому водород может быть причиной пористости сварного шва. С рядом легирующих металлов (титан, ниобий) водород вступает в химическое взаимодействие, образуя гидриды.

Азот растворяется в расплавленном металле. При концентрации азота выше предела растворимости, он вступает в химическую реакцию с легирующими элементами (титан, алюминий), образуя нитриды.

Взаимодействие металла с газовой фазой приводит к следующим последствиям: Выгоранию легкоокисляющихся легирующих элементов и снижению их содержания в сварном шве, по сравнению с содержанием в основном металле. Снижению прочностных параметров, а главное, пластических свойств, сварного шва. Образованию посторонних включений (твердых или газообразных) в сварном шве.

Уменьшить отрицательное влияние газовой атмосферы на свойства сварного шва возможно следующими способами: Созданием эффективной защиты дуги и сварочной ванны (покрытие электродов, флюсы, защитные газы, вакуум). Тщательной очисткой свариваемых поверхностей от окислов, жировых и т. п. пленок. Прокалкой сварочных материалов, осушкой защитных газов. Введением в состав сварочных материалов элементов - раскислителей, способных связать кислород в нерастворимые окислы (для железа - марганец, кремний, титан). Применением сварочных элементов, содержащих повышенное содержание легирующих элементов, выгорающих при сварке.

Взаимодействие расплавленного металла и шлака определяется химическим составом шлака и условиями перераспределения растворимых соединений между контактирующими жидкими фазами.

Одна из задач электродного покрытия и флюса - раскислить металл сварочной ванны, удалить из нее вредные примеси за счет связывания и перевода их в шлак в виде нерастворимых соединений. Следовательно, шлаки образуются в результате расплавления электродных покрытий и флюсов и их взаимодействия с расплавом и газовой атмосферой.

Раскисление – процесс восстановления чистого железа из его окислов, путем соединения окислов с другими элементами, у которых большее сродство с кислородом, чем у железа, и которые обладают большей растворимостью в сварочной ванне (легче всплывают в шлак).

При сварке сталей, в качестве раскислителей используют марганец, и кремний которые восстанавливают окись железа. Нерастворимые оксиды марганца и кремния выводятся в шлак. Марганец, дополнительно, взаимодействует с растворенной в железе серой, связывая ее в тугоплавкий сульфид марганца. Через шлак можно дополнительно легировать сварной шов.

Кристаллизация сварного шва начинается от границ оплавленных зерен и протекает путем роста столбчатых кристаллов к центру шва. Оси кристаллов перпендикулярны к поверхности движущейся

сварочной ванны. Поэтому, кристаллы изгибаются и вытягиваются в направлении сварки.

Междендритная ликвация приводит к расположению примесей по границам кристаллов, где они могут образовывать легкоплавкие эвтектики и неметаллические включения. Это снижает механические свойства сварного шва и может привести к образованию горячих трещин.

1.4.2 Влияние кислорода, азота, водорода на свойства металла шва и качество сварного соединения

1) *Кислород*. Металл сварочной ванны может окисляться за счет кислорода, содержащегося в газовой среде и шлаках в зоне сварки. Кроме того, окисление может происходить и за счет оксидов (окалины, ржавчины), находящихся на кромках деталей и поверхности электродной проволоки. При нагреве имеющаяся в ржавчине влага испаряется, молекулы воды диссоциируют, а получающийся кислород окисляет металл. Окалина при плавлении металла превращается в оксид железа также с выделением свободного кислорода. При недостаточной защите сварочной ванны окисление происходит за счет кислорода воздуха.

Кислород с железом образует оксиды: FeO (22,3% O₂); Fe₃O₄ (27,6% O₂), Fe₂O₃ (30,1% O₂). При высокой температуре сварочной дуги за счет атомарного кислорода в результате реакции



образуется низший оксид, который при понижении температуры может переходить в другие формы высших оксидов. Наибольшую опасность для

качества шва представляет оксид FeO, способный растворяться в жидком металле. Этот оксид обладает температурой плавления меньшей, чем у основного металла. Поэтому при кристаллизации металла шва он затвердевает в последнюю очередь. В результате он располагается в виде прослоек по границам зерен, что вызывает снижение пластических свойств металла шва. Чем больше кислорода в шве находится в виде FeO, тем сильнее ухудшаются его механические свойства. Высшие оксиды железа не растворяются в жидком металле и, если они не успевают всплывать на поверхность сварочной ванны, остаются в металле шва в виде шлаковых включений.

Железо может окисляться также за счет кислорода, содержащегося в CO₂ и парах воды H₂O.

В процессе сварки кроме железа окисляются и другие элементы, находящиеся в стали, - углерод, кремний, марганец. При переходе капель электродного металла в дуге окисление элементов происходит в результате взаимодействия их с атомарным кислородом газовой среды дугового промежутка по реакциям:



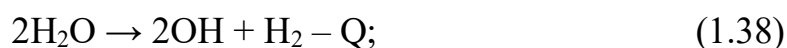
и за счет взаимодействия с оксидом железа в расплавленной ванне:



2) *Азот* в зону сварки проникает из окружающего воздуха. В зоне дуги азот находится как в молекулярном, так и в атомарном состояниях. Атомарный азот более активно растворяется в расплавленном металле сварочной ванны, чем молекулярный. Растворимость его зависит от температуры. При охлаждении свариваемого шва азот, выделяясь из раствора, взаимодействует с металлом шва и образует химические соединения: нитриды железа Fe_2N (11,1% N), FeN (5,9% N), марганца (MnN) и кремния (SiN). При больших скоростях охлаждения азот не успевает полностью выделиться и составляет с металлом пересыщенный твердый раствор. Такой азот со временем является причиной старения металла и снижения его механических свойств.

В низкоуглеродистой стали азота содержится до 0,006%, в металле шва при сварке незащищенной дугой содержание азота достигает 0,2%, а при сварке защищенной дугой — 0,03%. Азот является вредной примесью стали, так как, повышая прочность и твердость, он вместе с этим значительно снижает пластичность и вязкость металла.

3) *Водород*, так же как кислород и азот, растворяется в расплавляемом при сварке металле. Он попадает в металл из воздуха, содержащего пары воды, из влаги покрытия электродов; из ржавчины, находящейся на поверхности металла изделия и электродов. При высокой температуре влага превращается в пар и диссоциирует с поглощением тепла Q :



Водород содержится также в электродных покрытиях, в таких, как крахмал, целлюлоза и др., а также в самом металле. В небольших количествах он растворим в металле даже при комнатной температуре, однако с повышением температуры его растворимость растет и при переходе металла из твердого состояния в жидкое увеличивается с 0,0007 (8 см^3 на 100 г металла) до 0,0025 % (28 см^3 на 100 г).

Во время сварки при наличии значительного количества водорода во влаге или в покрытии электродов увеличивается разбрызгивание, так как с понижением температуры растворенный в ванне водород бурно выделяется из металла, вызывая его кипение и разбрызгивание. С началом кристаллизации ванны растворимость водорода резко падает, атомарный водород выделяется по реакции



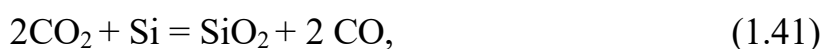
образуя молекулярный водород, который нерастворим в стали и уходит в шлак или атмосферу. Однако скорость кристаллизации может препятствовать удалению всего водорода, и часть его остается в шве в виде наружных и внутренних пор. Процесс выделения водорода из металла происходит и при комнатной температуре в атмосферу и в микроскопические полости, имеющиеся внутри металла. В результате образуются внутренние поры, в которых накапливается водород, создавая большое давление, что часто приводит к образованию микротрещин и, следовательно, к ухудшению прочностных характеристик наплавленного металла, особенно пластичности и ударной вязкости. При изломе такого металла в нем обнаруживаются так называемые «рыбьи глаза» в виде светлых пятен небольшого диаметра с маленькой полостью (порой) в середине. Наличие «рыбьих глаз» в изломе металла всегда свидетельствует о насыщении его водородом. Для удаления водорода иногда прибегают к выдерживанию сварных конструкций при комнатной температуре. Выдержка при температуре 250-300 °С ускоряет процесс выделения водорода. Водород является вредной примесью в стали, и при сварке следует избегать попадания влаги в шов, тщательно очищать поверхность металла от ржавчины и влаги и применять электроды с хорошо прокаленным покрытием.

1.4.3 Металлургические процессы при сварке толстопокрытыми электродами

Металлургические процессы сварки электродами с покрытием основного вида рассмотрим на примере сварки электродами УОНИ-13, содержащими

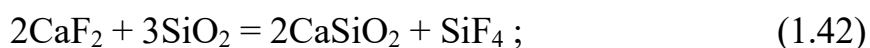
мрамор, плавиковый шпат, ферромарганец, ферросилиций, ферротитан, кварцевый песок и жидкое стекло.

При сварке под воздействием теплоты дуги происходит диссоциация мрамора и расчетное количество CO_2 , отнесённого к нормальной температуре и давлению, составит 30-45 см³ газа при сгорании 1 см длины электрода. Углекислый газ за счет ранее указанных, при температуре 700⁰С и выше восстанавливается в значительной степени до СО по реакциям:



но часть СО остаётся не восстановленной, газовая фаза во всём температурном интервале зоны сварки будет иметь окислительный характер по отношению к жидкому металлу, в то время как окисляющее действие шлака незначительно. Благодаря образованию плёнки шлака на каплях (при их переходе в шов) и на поверхности сварочной ванны, а главное в связи с количеством большого наличия раскислителей в расплавленном металле содержание кислорода будет не велико: не превышает его содержание в электродной проволоке.

Имеющийся в покрытии плавиковый шпат способен связывать водород по реакции, а присутствие в покрытии SiO_2 приводит к образованию тетрафторида кремния:



Образовавшийся тетрафторид кремния улетучивается, переходя в газовую фазу, где он воздействует с атомарным водородом или парами воды



и тем самым способствует уменьшению количества водорода в металле шва.

Значительная концентрация марганца в сварочной ванне способствует десульфации металла, а большое содержание в шлаке СаО наряду с десульфацией способствует удалению из металла фосфора. Содержание серы и фосфора в наплавленном металле не превышает 0,035% каждого и это делает швы, выполненные электродами этой группы, малочувствительными к кристаллизационным трещинам. Но установлено, что небольшое содержание кислорода в сварочной ванне уменьшает вероятность взаимодействия кислорода с растворенным в металле водородом.



Поэтому содержание растворенного в металле водорода настолько велико, что при наличии ржавчины на свариваемых кромках, повышенной влажности покрытия и сварке длинной дугой приводит к порам в шве, несмотря на эффективное удаление водорода за счет плавикового шпата, имеющегося в покрытии.

Обмазка в ванну переходит двояко:

- а) обволакивает каплю и вместе с каплей попадает в ванну;
- б) стекает в виде самостоятельных капель.

При сварке в реакциях металлургических процессов участвуют много элементов и каждая реакция оказывает свое влияние на шов, потому взяли наиболее вредный элемент и приняли его за критерий вредности – содержание азота в наплавленном металле. Содержание азота в наплавленном металле зависит от массы покрытия и введено понятие «коэффициент массы покрытия», под которым понимают отношение массы покрытия к массе покрытой части стержня электрода.

$$K_{\Pi} = m_{\Pi} / m_{\Pi \cdot \text{ст}} ; \quad (1.47)$$

Вывод: если «коэффициент массы покрытия» до 0,3, то качество защиты шва гарантировано, если более 0,3, то гарантии нет.

1.4.3.1 Раскисление металла шва

Раскисление – процесс восстановления чистого железа из его окислов, путем соединения окислов с другими элементами, у которых большее сродство с кислородом, чем у железа, и которые обладают большей растворимостью в сварочной ванне (легче всплывают в шлак).

Раскисление бывает двух видов:

Осаждающее раскисление – удаление вредных окислов из шва за счет введения в ванну элементов – раскислителей, у которых больше сродство к кислороду, чем к у железа.

Так при равных концентрациях и температуре 2000⁰С наибольшим сродством к кислороду обладает Ca, затем Mg, Al, Ti, Si, Mn, Fe, Ni, Cu. Вводя тот или иной элемент можно рассматривать с двух точек зрения. Он является раскисляющим, но одновременно и легирующим.

Вывод: все элементы стоящие слева от железа в основном идут, как раскисляющие и лишь частично как легирующие. Большинство уходят в шлак и сварочной ванной не усваиваются – остаются следы.

Все элементы справа от железа наоборот идут как легирующие.

Чтобы знать влияние того или иного элемента в сварочной ванне, введены понятия:

- коэффициент перехода того или иного элемента в ванну. Это отношение содержания какого-то элемента в наплавленном металле к суммарному содержанию этого же элемента в проволоке и обмазке.

- коэффициент усвоения элемента ванной характеризуется отношением содержания легирующего элемента в металле шва к суммарному его содержанию в материалах, участвующих в процессе, в том числе в основном металле.

Чем выше коэффициенты K_{Π} и $K_{\text{усв.}}$, тем выше эффективность защиты сварочной ванны (полнее раскисление и легирование шва).

Диффузионное раскисление заключается в том, что между основными оксидами (например, FeO), находящимися в расплавленном металле, и кислыми оксидами (например, SiO₂), находящимися в шлаке на границе металл-шлак происходит взаимодействие

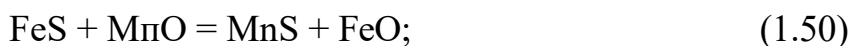


При этом образуется силикат железа (комплексное соединение), которое в составе шлаков всплывает на поверхность сварочной ванны. Чем выше концентрация кремнезема в шлаке над жидким металлом, тем интенсивнее протекает диффузионное раскисление. В результате оксид железа из сварочной ванны переводится в шлак и тем самым кислород выводится из металла шва.

1.4.3.2 Рафинирование шва

Сера и фосфор являются вредными примесями в сталях.

Сера попадает в сварочную ванну из основного металла, сварочной проволоки, покрытия и флюса. Она образует сернистое железо (сульфид железа FeS), которое имеет температуру плавления 940°C, т. е. более низкую, чем сталь. Поэтому при кристаллизации стали сернистое железо остается еще в жидком виде в прослойках между кристаллами сплава и является одной из причин образования горячих трещин при сварке. Серу удаляют введением марганца, который образует с ней химическое соединение — сернистый марганец (MnS) по реакциям:



Сернистый марганец не растворяется в жидком металле и полностью переходит в шлак.

Удалению серы способствует также окись кальция; при этом происходит реакция

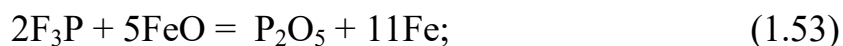


Влияние фосфора. Присутствие фосфора вызывает неоднородность металла шва, рост зерен и снижение пластичности, особенно при низких температурах (хладноломкость). Он присутствует в металле шва в виде фосфидов железа Fe_3P и Fe_2P . Удаление фосфора происходит при реакциях:

с закисью железа



или



с окисью кальция



или



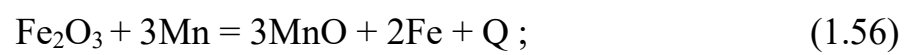
Получаемые соединения фосфора переходят в шлак. Основные шлаки лучше удаляют фосфор из металла, чем кислые.

1.4.3.3 Металлургические процессы при сварке электродами с различным видом покрытия

Электроды группы А при сварке создают значительное количество газов (CO_2 ; CO ; H_2 ; H_2O) в результате разложения и окисления органических компонентов и обеспечивают хорошую защиту от атмосферного воздуха.

Содержание гематита Fe_2O_3 в покрытиях этого типа требует значительного количества раскислителей, главным образом ферромарганца. Так, в электродах ЦМ-7 содержится до 33% гематита и около 30% ферромарганца, что достаточно для восстановления почти всего железа, но все же в сварочную ванну переходит достаточное количество марганца.

Окислительно-восстановительные процессы при сварке этими электродами можно передать следующими уравнениями реакций:





Первые два процесса экзотермичны и выделяют значительное количество теплоты. Восстановление железа из покрытия увеличивает коэффициент наплавки до 10...12 г/(А·ч).

Электроды группы Б при сварке осуществляют защиту зоны сварки вследствие разложения мрамора CaCO_3 , а оксид кальция CaO уходит на образование шлаковой системы основного типа $\text{CaO} - \text{CaF}_2$. Атмосфера сварочной дуги состоит из CO , CO_2 , H_2 и H_2O . Пары воды выделяются из покрытия и во избежание появления водорода в зоне сварки эти электроды надо перед сваркой прокалить при температуре 200...250° С (до 270° С).

Содержание в покрытии нескольких раскислителей позволяет получить хорошо восстановленный металл, содержащий мало серы и не склонный к образованию горячих трещин. При сварке высокопрочных, жаропрочных сталей применяют покрытия с пониженным содержанием CaCO_3 (15...20%), увеличивая CaF_2 (60...80%). В этом случае удастся избежать поглощения углерода сварочной ванной и обеспечить содержание углерода в металле шва на уровне (0,05...0,02%)С, как это требуется по техническим условиям. Недостаток этих электродов — малая устойчивость дугового разряда, требующая сварки на постоянном токе обратной полярности. Таким образом, технологические возможности электродов группы Б несколько ниже, чем электродов группы А. Повышенное содержание CaF_2 вызывает образование токсичных соединений и требует создания надежной вентиляции.

Электроды группы Р осуществляют защиту зоны сварки шлаками на основе TiO_2 , полевого шпата ($\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$), магнезита MgCO_3 , который, разлагаясь,

дает большой объем CO_2 , но, кроме того, защитная атмосфера пополняется органическими компонентами. Электроды этой группы обладают высокими технологическими свойствами — обеспечивают высокую устойчивость горения дуги, хорошее формирование шва и отделяемость шлаковой корки, возможность сварки в любом пространственном положении шва. Кроме того, рутиловые электроды малотоксичны и обеспечивают высокие механические свойства у наплавленного металла.

Электроды группы Ц с органическим покрытием содержат в своем составе до 50% органических веществ (пищевая мука, целлюлоза) и при их разложении и окислении выделяется большое количество газа, обеспечивающего хорошую защиту от воздушной среды. Для предотвращения водородной хрупкости или появления пор при сварке надо вводить окислители: TiO_2 , FeO , MnO . Для уменьшения влияния водорода в покрытия вводят также плавиковый шпат CaF_2 . Надежная газовая защита позволяет снижать относительную массу покрытия: $K_p \sim 20\%$. Технологические свойства электродов типа Ц (ОМА-2, ВСЦ, ВСП и др.) довольно высокие и их применяют при сварке в различных пространственных положениях. Электроды с основным покрытием имеют существенные преимущества перед другими группами покрытий. Поэтому электроды этого типа рекомендуются для сварки ответственных конструкций из сталей повышенной прочности ($\sigma_b > 500 \text{ МПа}$).

Металлургические процессы при сварке электродами сильно зависят от характера переноса электродного металла, что, в свою очередь, зависит от плотности электродного тока. При малых плотностях тока капли электродного металла крупные, долго находятся на торце электрода и при коротком замыкании между каплей и сварочной ванной переходят в нее лишь частично (40...30% объема капли). Разрыв металлического мостика сопровождается разбрызгиванием. При больших плотностях тока (800... 1000 А на 1 мм диаметра электрода) наблюдается мелкокапельный перенос металла и капли пролетают дуговой промежуток с большой скоростью. Это влияет на интенсивность протекания металлургических процессов при сварке.

Металлургические процессы при сварке электродами сильно зависят от характера переноса электродного металла, что, в свою очередь, зависит от плотности электродного тока. При малых плотностях тока капли электродного металла крупные, долго находятся на торце электрода и при коротком замыкании между каплей и сварочной ванной переходят в нее лишь частично (40...30% объема капли). Разрыв металлического мостика сопровождается разбрызгиванием. При больших плотностях тока (800... 1000 А на 1 мм диаметра электрода) наблюдается мелкокапельный перенос металла и капли пролетают дуговой промежуток с большой скоростью. Это влияет на интенсивность протекания металлургических процессов при сварке.

Легирование металла шва при ручной сварке покрытыми электродами. Металл шва образуется из основного металла, электродной проволоки и покрытия, легирование осуществляется следующим образом:

а) легирование путем введения в покрытие электрода порошкообразных металлических добавок или ферросплавов — марганца, кремния, титана и др.;

а) легирование путем введения в покрытие электрода порошкообразных металлических добавок или ферросплавов — марганца, кремния, титана и др.;

б) легирование в результате восстановления оксидов, входящих в состав покрытия, легко осуществляемое для малоактивных металлов (никель, медь) и ограниченное для таких элементов, как марганец, кремний и хром;

в) легирование путем изменения состава электродных проволок, дающее самые стабильные результаты;

г) легирование в результате расплавления основного металла, что имеет место при сварке высокопрочных и теплоустойчивых сталей.

При определении степени легирования металла шва при сварке электродами следует учитывать потери легирующих элементов, возникающие вследствие испарения, разбрызгивания металла и окислительно-восстановительных реакций со шлаком в зоне сварки.

В настоящее время продолжается работа по разработке новых малотоксичных электродов с пониженным содержанием флюорита (CaF_2) и пониженным содержанием марганца.

Общие требования к электродам: точность размеров, соосность покрытия и стержня, прочность сцепления покрытия с металлическим стержнем (сколы), гарантированные механические свойства наплавленного металла. Каждая партия электродов имеет соответствующий паспорт. На электрод составляются соответствующие каталоги, облегчающие их выбор для проведения тех или иных сварочных работ.

1.4.4 Металлургические процессы при сварке под флюсом и в защитных газах

1.4.4.1 Металлургические процессы при сварке под флюсом

При сварке под плавными флюсами защита зоны сварки от окружающего воздуха происходит более эффективно, что подтверждается содержанием азота. При сварке тонко покрытыми электродами содержание азота в металле шва составляет 0,12—0,2%, а при сварке толстопокрытыми электродами 0,013—0,030%, а под плавным флюсом 0,008%.

Имеется ряд особенностей металлургических процессов при сварке под флюсом. Особенно интенсивно протекают металлургические процессы между жидким флюсом и металлом, в результате которых изменяется состав металла шва.

Сварка низкоуглеродистой стали под марганцовистыми высококремнистыми флюсами характеризуется протеканием в высокотемпературных участках зоны сварки следующих кремнемарганцево-восстановительных реакций:



Также имеет место окисление углерода, содержащегося в сварочной проволоке и основном металле по реакции.

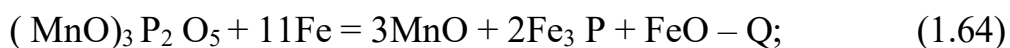


Образующийся в высокотемпературном участке сварочной зоны оксид железа частично растворяется в жидком металле сварочной ванны, частично переходит в шлак.

На участках сварочной ванны позади дуги при понижении температуры жидкого металла, вплоть до затвердения, имеет место раскисление металла. При температурах, близких к затвердению металла ванны, кремний и марганец подавляют реакцию окисления углерода, что уменьшает вероятность образования пор. При недостаточном содержании во флюсе кремнезёма усиленно выгорает кислород и в шве могут образоваться поры. Следовательно, при сварке низкоуглеродистой стали сварочной проволокой с малым содержанием кремния, чтобы избежать образования пор за счет окисления углерода, следует применять высококремнистый флюс.

Благодаря протеканию реакций (1.61), (1.62) металл шва обогащается кремнием и марганцем, а содержание углерода окажется несколько меньше исходного. Обогащение металла шва марганцем важно ещё и потому, что он обеспечивает десульфацию металла шва, предупреждая тем самым горячие трещины. Исследования показали, что для предупреждения образования горячих трещин в металле шва при сварке под флюсом низкоуглеродистых сталей в шве должно быть не менее 06-08% марганца.

В плавленные флюсы сера и фосфор попадают из исходных материалов, например из марганцевой руды. Если во флюсе имеются оксиды фосфора, то фосфор легко восстанавливается при сварке и переходит в металл шва. Переход фосфора из кислых, высокомарганцевых флюсов протекает по реакции:



При этом переходе фосфора и серы из флюса в шов зависит от содержания их, а так же от марганца во флюсе и режима сварки. С увеличением содержания оксида марганца во флюсе увеличивается его взаимодействие с металлом сварочной ванны, вследствие чего он связывает и переводит в шлак большее количество серы. Но с увеличением закиси оксида марганца во флюсе возрастает,

и содержание фосфора, что способствует увеличению перехода фосфора в шов по реакции (1.64).

Изменение таких величин режима сварки, как силы сварочного тока и напряжение, изменяет содержание серы и фосфора в шве. При увеличении сварочного тока увеличивается количество расплавленного флюса, вследствие чего содержание фосфора в шве уменьшается, а серы несколько возрастает.

Повышение напряжения дуги при неизменённом токе приводит к тому, что количество расплавленного флюса по отношению к количеству расплавленного металла значительно возрастает, вследствие чего переход марганца и кремния в шов увеличивается. Так же возрастает переход фосфора, а содержание серы в металле шва уменьшается.

Повышение содержания оксида кальция во флюсе за счет соответствующего снижения содержания окиси марганца несколько увеличивает переход серы в металл шва, что указывает на превалирующую роль марганца в десульфации металла при автоматической сварке.

Наличие в составе керамических флюсов ферросплавов обуславливает следующие особенности металлургических процессов при сварке под керамическими флюсами:

- более полное раскисление наплавленного металла;

1.4.4.2 Металлургические процессы при электрошлаковой сварке

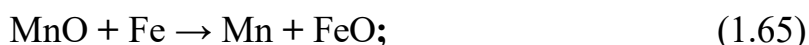
Металлургические процессы при электрошлаковой сварке отличаются от аналогичных процессов при дуговой сварке следующими особенностями:

- в плавильной зоне отсутствует газовая фаза;
- температура в зоне сварки ниже, чем при дуговой сварке;
- сменность шлака-флюса незначительна;
- при сварке имеет место электролиз шлака шлаковой ванны;
- поверхность шлаковой ванны заметно окисляется кислородом воздуха.

Не рассматривая влияния каждого фактора в отдельности, необходимо отметить, что при электрошлаковой сварке может иметь место изменение химического состава металла шва по его длине.

Непостоянство химического состава шва по длине обусловлено непостоянством перехода элементов из шлака в шов и непостоянством окисления элементов.

В первые моменты электрошлаковой сварки (на длине шва 150—200 мм) происходит значительное обогащение металла шва марганцем и кремнием вследствие их восстановления из окислов этих элементов, входящих в состав флюса. Окисление железа происходит из-за большой его концентрации в металле по реакции:

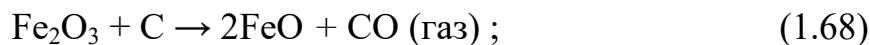
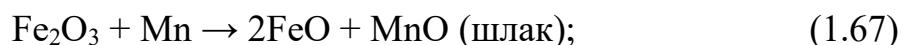


По мере накопления в шлаке FeO этот процесс затухает и после выполнения шва длиной 150—200 мм восстановление марганца и кремния из шлака уже не происходит.

Кроме того, имеет место непостоянство окисления элементов, входящих в состав проволоки, а также обеднение шва этими элементами. А окисление переходящих капель происходит из-за образования высших окислов в шлаке в результате воздействия на него воздуха. При этом у поверхности шлаковой ванны происходит следующая реакция:



Когда в шлаке накопится значительное количество Fe₂O₃ (после выполнения шва длиной 100—150 мм), на поверхности капель электродного металла происходят другие реакции:



В результате этого процесс может привести к выгоранию как полезных (кремний, марганец), так и вредных примесей (сера), содержащихся в проволоке в малых количествах.

Из-за возможности электролиза шлака шлаковой ванны, род тока и полярность существенно влияют на химический состав металла шва. Шлак представляет собой электролит, состоящий из ионов металла, кислорода и окислов металлов. Если сварка производится постоянным током при прямой полярности, то к катоду (в данном случае — сварочной проволоке) направляются элементы и соединения, имеющие положительный заряд (положительные ионы марганца, железа и др.). Повышение концентрации ионов марганца у поверхности проволоки уменьшает вероятность его окисления и перехода в шлак. Это способствует сохранению марганца в каплях электродного металла и даже повышению его содержания вследствие восстановления ионов до атомов: $Mn^{+} + e \rightarrow Mn^0$.

Отрицательные ионы (кислород и кислородосодержащие элементы) направляются к аноду — сварочной ванне, температура которой ниже, а удельная поверхность ванны относительно объема жидкого металла менее нагрета по сравнению с каплями электродного металла. Поэтому окисление марганца и других элементов в металлической ванне невелико. В итоге шов не только обедняется, но даже обогащается Mn, Si и другими элементами.

При обратной полярности к аноду (к сварочной проволоке) направляются ионы кислорода и ионы кислородосодержащих соединений, которые, попадая на более нагретую поверхность образующихся капель металла, интенсивно окисляют марганец и другие полезные примеси. Это приводит к обеднению шва Mn, Si и другими элементами, повышающими прочность шва и его стойкость против горячих трещин, т. е. ухудшает качество шва.

Переход марганца и других полезных примесей из проволоки при сварке на переменном токе будет меньше, чем при прямой полярности, и больше, чем при обратной.

Когда необходимо сохранить нужное количество элементов-раскислителей в металле шва, сварку производят специально легированной марганцем, кремнием и другими элементами проволокой Св-10ГС, Св-10Г2С.

Сварочная проволока для электрошлаковой сварки подбирается, исходя из требований к составу металла шва, который практически незначительно зависит от состава флюса.

1.4.4.3 Metallurgical processes during welding in protective gases

Углекислый газ CO_2 получил наибольшее распространение из активных защитных газов. Особенность металлургических процессов в этом случае обусловлена его сильным окислительным действием. Газовая среда в дуге, горящей в CO_2 , имеет более окислительный характер (33% O_2), чем при горении ее на воздухе (21% O_2). Поэтому наблюдается сильное окисление сварочной ванны по реакции



Одновременно происходит диссоциация углекислого газа. Атомарный кислород также окисляет в сварочной ванне железо и другие Примеси: кремний, марганец, углерод и др. Эти реакции происходят как в период перехода капель электродного металла в дуге, так и на поверхности самой ванны. Для управления реакцией окисления, а также пополнения потерь элементов применяют электродные проволоки с повышенным содержанием марганца и кремния (Св-08ГС, Св-08Г2С и др.). При использовании этих проволок в зоне понижения температуры в сварочной ванне протекают реакции раскисления.

Образующиеся оксиды марганца и кремния всплывают на поверхность сварочной ванны.

Инертные защитные газы (аргон, гелий) не растворяются в расплавленном металле и не образуют в ванне химических соединений. Состав металла шва при сварке в инертных газах определяется составом основного и присадочного металлов, а также развитием металлургических процессов при сварке.

Инертные газы сами не взаимодействуют с металлами, однако, при сварке в зоне дуги могут протекать реакции взаимодействия между элементами,

входящими в состав основного и присадочного металла. Помимо этого, происходит взаимодействие нагретого и расплавленного металла с примесями инертных газов (O_2 , N_2 , H_2 , H_2O и др.), с газами и веществами, адсорбированными на поверхности металла и проволоки. Интенсивность взаимодействия зависит от химического состава свариваемого металла, состава и парциального давления компонентов газовой фазы у поверхности ванны и температуры ванны.

Ход металлургических реакций и состав металла шва можно регулировать путем изменения температуры и размеров сварочной ванны, длительности взаимодействия металла с газами, введением в металл легкоиспаряющихся элементов.

Окислению сварочной ванны способствуют находящиеся примеси в защитном газе в виде свободного кислорода и паров воды. При этом окисляется в основном углерод с образованием газообразного оксида CO . Для подавления реакции окисления углерода в сварочной ванне должно находиться достаточное количество раскислителей кремния, марганца. С этой целью при сварке углеродистых сталей используют те же электродные проволоки, что и при сварке в углекислом газе, - с повышенным содержанием раскислителей.

1.4.5 Кристаллизация металла шва. Механизм кристаллизации

Кристаллизацией называется процесс образования зерен (кристаллитов) расплавленного металла при переходе его из жидкого состояния в твердое. Это, так называемая, первичная кристаллизация. Существует еще вторичная кристаллизация, при которой происходит изменение структуры уже затвердевшего металла. При вторичной кристаллизации стремятся к измельчению зерна, что улучшает механические свойства стали. Легирование металла шва через покрытие электродов, а также надежная защита металла сварочной ванны способствуют получению достаточно чистого, без включений, металла шва необходимого химического состава с требуемыми свойствами.

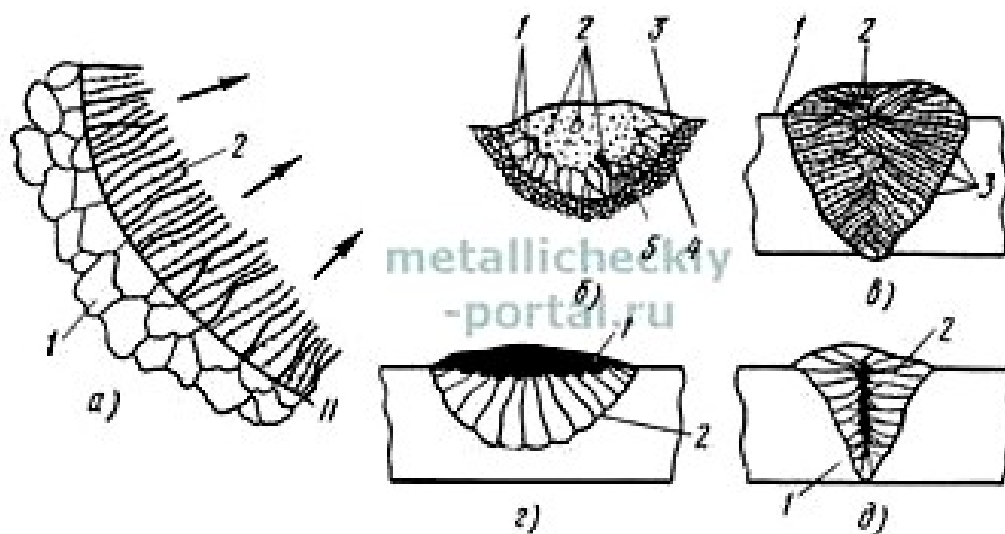
Первичная кристаллизация металла шва начинается в результате его охлаждения при отводе тепла в толщу твердого металла, окружающего сварочную ванну. Сначала возникают отдельные центры кристаллизации, а от них начинают расти уже сами кристаллы, образующие зерна металла.

Первичная кристаллизация зарождается в первую очередь по линии сплавления I—II (рисунок 1.29,а), на границах частично оплавленных зерен твердого металла, так как именно здесь начинается охлаждение ванны. Кристаллы растут в сторону толщи металла шва, как показано стрелкой, перпендикулярно плоскости отвода тепла. Количество, форма и расположение зерен зависят от места зарождения центров кристаллизации, скорости роста зерен, скорости охлаждения и направления отвода тепла, а также от наличия в расплавленном металле посторонних включений. При затвердевании металла сварочной ванны (рисунок 1.29, б) сначала возникают быстрорастущие кристаллы вследствие интенсивного отвода тепла в основной металл. Между ними появляются более мелкие и медленнее растущие кристаллы, поскольку от них тепло отводится не так быстро. Затем зерна смыкаются и из них продолжают расти только те, которые расположены перпендикулярно поверхности раздела между твердым и жидким металлом. При уменьшении скорости охлаждения центры кристаллизации возникают более равномерно по всему объему металла, а зерна растут во все стороны. Первичная кристаллизация металла шва протекает периодически и при специальном травлении в нем можно различить слоистое строение.

Металл шва в результате первичной кристаллизации получает или гранулярную (зернистую) структуру, при которой зерна не имеют определенной ориентировки, а по форме напоминают многогранники, или столбчатую и дендритную структуру, при которой зерна вытянуты в одном направлении (рисунок 1.29, в). При столбчатой структуре зерна имеют компактную вытянутую форму, при дендритной — ветвистую, напоминающую дерево. Дендриты обычно располагаются в столбчатых зернах, являясь их основой.

Чем быстрее охлаждение металла, тем больше образуется центров кристаллизации и тем мельче будут зерна. При медленном охлаждении в процессе затвердевания металл приобретает крупнозернистое строение. Столбчато-дендритная структура с крупными зернами (см. рисунок 1.29, в) характерна для сварки под флюсом, где охлаждение металла шва происходит медленнее, чем при ручной сварке. Гранулярная структура присуща сварке покрытыми электродами.

Она может быть крупной и мелкой, в зависимости от условий охлаждения и кристаллизации. Мелкозернистая гранулярная структура повышает механические свойства наплавленного металла.



а – образование кристаллов на границе расплавления (линия 1 – 11);

1 – основной металл; 2 – металл шва;

б – схема кристаллизации металла шва при ручной дуговой сварке покрытыми электродами; 1 – кристаллы с большой скоростью роста; 2 – неметаллические включения (шлаки); 3 – кристаллы с малой скоростью роста;

в – схема столбчатой (дендритной) структуры сварного шва при сварке под флюсом; 1 – основной металл; 2 – металл шва; 3 – зерна дендритов;

г – направление роста кристаллов в широком шве; 1 – неметаллические включения; 2 – зерна металлов;

д – направление роста кристаллов в узком шве; 1 – основной металл; 2 – зерна металла.

Рисунок 1.29 – Схема кристаллизации и строения металла шва

Зерна основного металла отличаются по форме от зерен металла шва тем, что они деформированы и вытянуты в направлении прокатки.

Находящиеся в жидком металле примеси и загрязнения (окислы, шлаки и др.) имеют более низкую температуру затвердевания, чем металл, и при

застывании располагаются по границам зерен, ухудшая их сцепление между собой. Это снижает прочность и пластичность наплавленного металла. Чем чище наплавленный металл, тем выше его механические свойства. Форма шва имеет значение для направления кристаллизации и расположения неметаллических включений. При широких швах (рисунок 1.29, г) эти включения вытесняются вверх и могут быть легко удалены; при узких швах (рисунок 1.29, д) включения часто остаются в середине шва между зернами.

1.4.5.1 Ликвация в металле шва

Процесс электрической сварки плавлением характеризуется химическими реакциями, которые возникают между расплавленным металлом и окружающей его средой. При переносе металла с электрода в сварочную ванну капли и пары электродного металла, нагретые до высоких температур, взаимодействуют с газовой фазой и жидким шлаком. Расплавленный металл сварочной ванны также взаимодействует с газовой атмосферой, жидким металлом и окружающим её основным металлом. Поэтому химический состав наплавленного металла может существенно отличаться от химического состава электродов, а зона термического влияния – от исходного состояния основного металла. Это ещё усугубляется высокими температурами на отдельных участках дуги, кратковременностью пребывания металла в жидком состоянии, быстрым изменением температурного режима.

При кристаллизации металла шва имеет место ликвация. *Ликвацией* называют неравномерное распределение составляющих сплава, приводящих к неоднородности его химического состава. Ликвация обусловлена наличием в металле шва легирующих элементов и примесей, нерастворимых в нём или обладающих ограниченной растворимостью при температуре затвердевания – это сера, фосфор, углерод и другие.

Ликвация бывает зональная и дендритная.

Зональная (макроскопическая) ликвация в металле шва характеризуется различием химического состава периферийной и центральной его части. Вызывается это тем, что металл периферийных зон шва, затвердевший в первую очередь, содержит минимальное количество ликвирующих примесей. Содержание

же примесей в оставшемся жидком расплаве возрастает. По мере роста кристаллов расплав обогащается примесями, имеющими низкую температуру затвердевания, которые оттесняются в середину шва, поэтому центральная часть шва оказывается наиболее загрязнённой примесями; в этой части шва оказывается так называемая зона слабины шва.

Дендритная (внутрикристаллическая) микроскопическая ликвация характеризуется неоднородностью химического состава отдельных составляющих кристаллитов. Это возникает, потому что при затвердевании металла шва первые кристаллиты, образующие оси, а затем ветви дендритов, содержат меньше примесей, чем исходный жидкий расплав. По мере роста осей и ветвей дендрита расплав обогащается примесями, и образующийся кристаллит оказывается неоднородным по химическому составу. Центральные и начальные части дендритов состоят из наиболее чистого твёрдого раствора, а меж дендритные пространства и особенно пограничные зоны его наиболее загрязнены.

1.4.5.2 Структура металла шва и зоны термического влияния. Участки в зоне термического влияния

Исходя из понятия зоны термического влияния (это нагреваемая область), нетрудно предположить, что на разном удалении от шва деталь нагревается. Структура сварного шва заданного химического состава определяется условиями охлаждения, влияющими на процессы вторичной кристаллизации и на диффузионные процессы.

Участок основного металла, подвергшийся в процессе сварки нагреву до температуры, при которой в нем происходят изменения структуры металла, называют *околошовной зоной* (зоной термического влияния – ЗТВ). Температура, до которой нагреваются отдельные точки *околошовной зоны*, изменяются от температуры плавления до окружающей, а структура металла околошовной зоны зависит от его химического состава, теплофизических свойств и от термического цикла сварки.

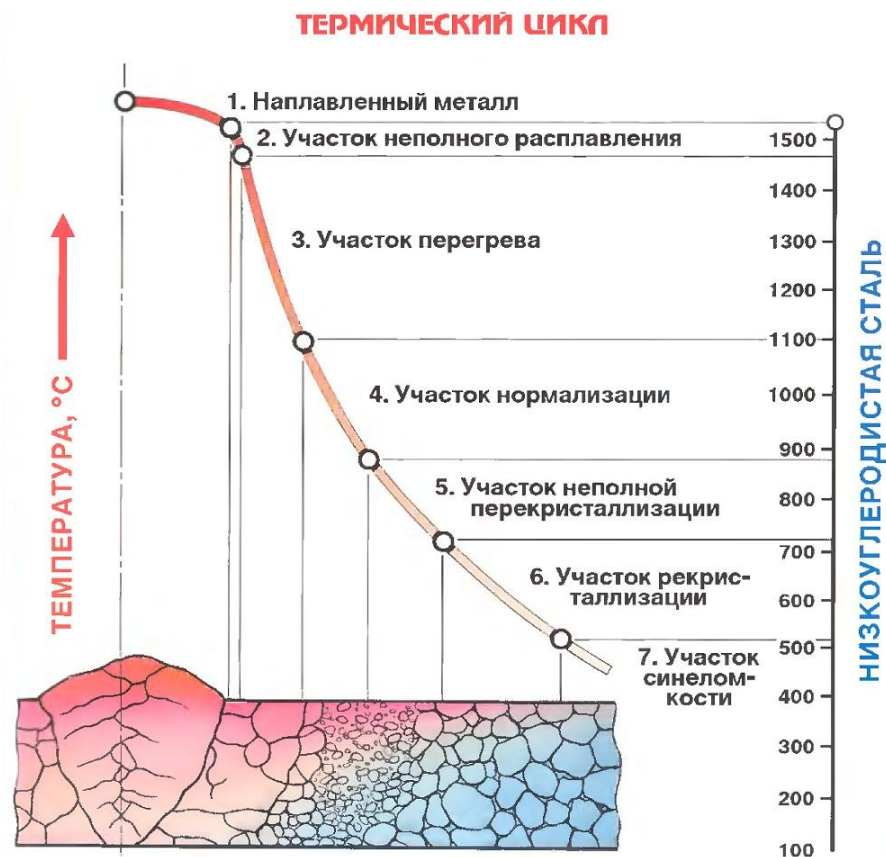


Рисунок 1.30 – Строение зоны термического влияния

В зависимости от температуры нагрева и, следовательно, структурных и физико-химических изменений в околошовной зоне наблюдается несколько участков.

Схема структурных изменений в зоне термического влияния (околошовной зоне) представлена на рисунке 1.30.

2– участок неполного расплава. Он является переходным, металл находится в состоянии диффузии наплавки и основного сплава, соединяются две фазы – жидкая и твердая. Протяженность участка небольшая, от 100 до 500 микрон. При температуре 1500°С начинается образование крупных зерен.

3– участок перегрева (длина 3–4 мм), в сплаве образуются крупные зерна, характерные для закалочного процесса, δ -железо переходит в γ -железо. Ударная вязкость и пластичность стали снижаются. Температура постепенно падает с 1500 °С до 1100°С.

4 – участок нормализации или перекристаллизации (длина от 200 мкм до 1,5 мм, T – от 1100 до 900°C). Металл находится в температурном интервале. Образуются вторичные мелкие зерна (ферритовая фаза), физические свойства сплава близки к начальным.

5 – участок неполной перекристаллизации (длина от 500 мкм до 1,2 мм, T – от 900 до 725°C). Мелкие зерна чередуются с перлитными пластинками. Физические свойства хуже, чем на 3-м участке.

6 – участок рекристаллизации или старения (длина до 1,5 мм, T – от 725 до 450°C). Структура, характерная для нагартованного металла, разрушается. При нагреве до точки пластичности металл восстанавливается, формируются зерна стандартной величины.

7 – участок синеломкости, переход к основному металлу, температура понижается до 200°C. На сплаве видны синеватые пятна побежалости. Происходит насыщение поверхностного слоя азотом, водородом и углекислым газом с образованием нитридов, карбидов. Прочность стали повышается, пластичность снижается.

При сварке других сталей, в многопроходных швах структура ЗТВ меняется. Размеры зоны термического влияния зависят от нескольких факторов: толщины заготовок, химического состава стали, вида сварочного аппарата, они устанавливаются экспериментальным путем

1.4.5.3 Влияние погонной энергии на металл шва и околошовной зоны

Погонная энергия (q_n) — это отношение эффективной тепловой мощности сварочной дуги, расходуемой на нагрев изделия ($Q_{эф}$), к скорости перемещения дуги ($V_{св}$) и определяет количество тепла, введенное дугой в единицу длины сварного шва, по формуле (1.21).

$$q_n = Q_{эф} / V_{св} = I_d \cdot U_d \cdot \eta / V_{св};$$

Следовательно, увеличение погонной энергии приводит к увеличению площади сечения сварного шва, т. е. к изменению доли участия основного

металла в металле шва и формы валика. Скорость перемещения сварочной дуги при однопроводной сварке равна скорости сварки.

Величина и характер сварочных напряжений и остаточных деформаций находятся в прямой зависимости от *погонной энергии сварки*. Увеличение сечения шва или слоя приводит к заметному росту величины остаточной деформации. Для обеспечения минимальной деформации сварной конструкции следует назначать наименьшие (допустимые из условий прочности конструкции) сечения швов и не допускать их увеличения в процессе изготовления конструкции. На зависимости между величиной остаточной деформации и режимом сварки (погонной энергией) основан расчетный метод определения остаточных деформаций. Общепринятый подход к регулированию свойств сварных соединений термически упрочненных сталей базируется на ограничении *погонной энергии сварки*. Характерно, что наибольшие допустимые значения погонной энергии сварки для получивших распространение термически упрочненных сталей не превышает, как правило, 6 - 8 ккал / см. Это обстоятельство приводит к увеличению числа проходов при сварке толстолистового проката и снижает эффективность сварочной технологии.

Величина и характер сварочных напряжений и остаточных деформаций находятся в прямой зависимости от *погонной энергии сварки*, которая определяется выбранным режимом. Тогда для обеспечения требуемой скорости охлаждения нужно либо подогреть изделие, либо увеличить *погонную энергию сварки*.

На процесс возникновения холодных трещин влияет химический состав металла, содержание водорода и величина *погонной энергии сварки*. Больше всего трещины образуются в сварных соединениях при сварке изделий из средне - и высоколегированных сталей перлитного и мартенситного классов электродами аналогичного состава. Реже холодные трещины появляются при сварке аустенитных швов и низколегированных ферритно-перлитных сталей. Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что наличие водорода в металле приводит к снижению его механических свойств и уменьшает стойкость против образования холодных трещин. На процесс возникновения холодных

трещин могут влиять режимы сварки, так как структурные превращения зависят от перегрева околошовной зоны, скорости охлаждения металла околошовной зоны и шва. Если ограничить перегрев и исключить образование мартенсита или сместить температурный интервал его образования в зону высоких температур, а также заметно снизить скорость охлаждения в мартенситном интервале температур, можно существенно уменьшить возможность появления холодных трещин в сварном соединении.

1.4.6 Образование трещин и газовых пор в металле шва

В процессе кристаллизации сварочной ванны в металле шва возможно образование трещин. По расположению относительно оси шва они могут быть продольными и поперечными, в зависимости от величины - микро- и макроскопическими (первые из них обнаруживаются с помощью микроскопа, а вторые - невооруженным глазом); в зависимости от температур, при которых они образуются, трещины разделяют на две группы: горячие (высокотемпературные) и холодные (низкотемпературные). Механизм их возникновения различен.

Горячие трещины представляют собой хрупкие межкристаллические разрушения металла шва и околошовной зоны, возникающие в процессе кристаллизации в твердо-жидком состоянии, а также при высоких температурах в твердом состоянии. Трещины, как правило, располагаются по границам кристаллитов и вызывают межкристаллическое разрушение. Объясняется это тем, что при затвердевании металла шва в процессе первичной кристаллизации между кристаллитами располагаются жидкие прослойки, имеющие небольшую температуру плавления. Если возникающие в это время в металле растягивающие внутренние напряжения (вследствие линейной усадки при охлаждении) будут достаточно велики, то по этим прослойкам произойдет разрушение с образованием трещины. Если же процесс полного затвердевания расплава заканчивается до появления больших растягивающих напряжений, то горячие трещины не образуются. Образованию горячих трещин способствует содержание в металле шва примесей - серы, фосфора и др. Так, сера образует легкоплавкий сульфид железа FeS, располагающийся при кристаллизации по границам зерен и увеличивающий вероятность образования трещин. На образовании трещин

сказываются также форма и схема кристаллизации сварочной ванны. Узкие швы с глубоким проплавлением более склонны к образованию трещин, чем широкие швы с небольшим проплавлением.

Для уменьшения склонности швов к образованию горячих трещин применяются технологические и металлургические меры:

- 1) применение режимов сварки, обеспечивающие получение более благоприятной формы шва;
- 2) уменьшение доли основного металла в металле шва;
- 3) использование основного и сварочных материалов с минимальным содержанием серы, фосфора, углерода и с достаточным содержанием марганца;
- 4) введение в шов модификаторов (титан, алюминий и др.) , измельчающих первичную структуру металла шва;
- 5) различные мероприятия, способные приводить к измельчению структуры первичной кристаллизации.

Холодные трещины в структуре металла располагаются как по границам, так и по телу зерен. Поэтому они представляют собой внутрикристаллические разрушения. Холодные трещины в сварных соединениях образуются при температурах 200 - 300°C. Чаще всего они образуются в швах при сварке закаливающихся сталей. На склонность металла к образованию холодных трещин оказывают влияние повышенное содержание углерода и элементов, облегчающих закалку, наличие в шве водорода, загрязнение фосфором, быстрое охлаждение и наличие в швах внутренних напряжений. Холодные трещины, как правило, зарождаются по истечении некоторого времени после окончания сварки, а затем на протяжении нескольких часов и даже суток распространяются как вдоль, так и поперек околошовной зоны, а иногда и шва.

Этот характер разрушения – результат совместного действия в сварном соединении тепловых, сварочных и структурных напряжений, крупнозернистого игольчатого строения мартенсита и заметного снижения пластичности металла в связи с растворением в нем водорода.

Холодные трещины в сварных соединениях являются типичными дефектами сварных соединений из средне- и высоколегированных сталей перлитного и мартенситного классов.

Для предупреждения холодных трещин в сварных соединениях применяют:

- предварительный и сопутствующий подогрев при сварке;
- используют сварочные материалы с минимальным содержанием водородопроизводящих компонентов;
- выбор оптимального режима сварки;
- правильную последовательность наложения швов;
- термообработку соединений сразу после сварки .

Поры в сварных швах возникают при первичной кристаллизации металла сварочной ванны в результате выделения газов. Поры представляют собой полости в швах, заполненные газом, имеющие сферическую, вытянутую или более сложные формы. Поры могут располагаться по оси шва, его сечению или вблизи границы сплавления. Они могут быть скрытыми в металле или выходить на поверхность, располагаться цепочками, отдельными группами или одиночно, могут быть микроскопическими и крупными (до 4 - 6 мм в диаметре). Поры при сварке в основном возникают за счет газов водорода, азота и оксида углерода, образующихся в результате химических реакций с выделением газовых продуктов, выделения газов в связи с разной растворимостью их в жидком и твердом металле, захватом газа из окружающей среды при кристаллизации сварочной ванны.

Для уменьшения пористости необходимы тщательная подготовка поверхности основного и присадочного металлов под сварку (очистка от ржавчины, масла, влаги, прокалка и т. д.), надежная защита зоны сварки от воздуха, введение в сварочную ванну элементов - раскислителей (из основного металла, сварочной проволоки, покрытия, флюса), стабильное соблюдение режимов сварки.

1.4.7 Старение и коррозия металла сварных швов. Межкристаллитная коррозия

Старение металла – процесс физико-химического разрушения металла с течением времени, сопровождающийся изменением механических свойств металла (падает ударная вязкость, повышается хрупкость металла).

Если процесс старения происходит при комнатной температуре, то он называется *естественным старением*, а если при нагревании до определенной температуры с последующим охлаждением – *искусственным старением*.

Старение объясняется тем, что в любом металле, пересыщенном кислородом, азотом, водородом и другими элементами, с течением времени они выходят из металла, вызывая искажение кристаллической решетки, а следовательно изменение механических свойств металла.

Склонность стали к старению определяется по падению ударной вязкости и по критической температуре хрупкости металла T_k . За величину критической температуры хрупкости металла принимается наименьшая температура, при которой ударная вязкость не снижается менее 30 Дж/см².

Коррозия – процесс физико-химического разрушения металла под действием окружающей среды. Коррозию могут вызывать агрессивные среды (кислоты, щелочи, морская вода и др.), в которых работают ряд конструкций.

По характеру процесса различают:

-*химическая коррозия* – процесс окисления металла под действием окружающей среды, без появления электрического тока;

-*электрохимическая коррозия* – процесс физико-химического разрушения металла в электролитах (кислоты, щелочи и их растворы, морская вода, растворы солей в воде) и сопровождается появлением электрического тока.

Стойкость металла против коррозии зависит:

- от химического состава и структуры металла;
- от состояния поверхности которая подвергается коррозии;
- от величины внутренних напряжений в металле;
- от температуры и давления окружающей среды.

Величина коррозии определяется:

- глубина коррозии в мм в течении года; мм/год;
- потеря веса металла в граммах в одном квадратном метре площади в течении года: $\text{г/м}^2 \cdot \text{ч}$.

Зная механизм образования и характер химической и электрохимической коррозий, для ее предупреждения принимаются меры:

- лакокрасочные покрытия;
- масло покрытие;
- химическая защита (никелирование, азотирование, оцинковка);
- гуммирование.

В судостроении основным видом защиты являются лакокрасочные покрытия. Подводная часть корродирует быстрее.

Основной коррозионной средой судовых конструкций является морская вода, в которой содержатся растворы различных солей.

Коррозионная стойкость судовых конструкций зависит в значительной степени от чистоты их обработки. Бугорчатая поверхность сварных швов, выступающие головки заклепок и других крепежных деталей могут быть причинами интенсивной местной коррозии. Ускоряет коррозию наличие окалины на поверхности судовых конструкций, даже находящейся под слоем краски.

Анализ причин коррозии показал, что окалина, не удаленная с металла корпуса, обладая более высоким потенциалом, образует на этой части поверхности корпуса катод. На поверхности сварных швов окалина отсутствует и при износе лакокрасочного покрытия металл швов, являясь анодом по отношению к окалине, подвергается интенсивному коррозионному износу.

Но даже при отсутствии окалины на основном металле металл шва часто подвергается более интенсивному коррозионному износу, чем основной металл. Причиной является то, что металл шва по химическому составу и структуре отличается от основного металла.

Для повышения коррозионной стойкости на конструкциях и малоуглеродистой и низколегированной стали при эксплуатации в морской воде необходимо в материалов применять: сварные швы ввести большее количество

элементов аустенизаторов. Используется никель. Для конструкций, работающих в морской среде, рекомендуют в качестве сварочных материалов применять:

- ручная дуговая сварка – электроды марки Э – 138/50Н;
- сварка в защитном газе CO_2 – проволока марки Св – 08ГСНТ;
- автоматическая под флюсом – проволока марки Св – 10ГН; Св – 08ГНА.

Межкристаллитной коррозией называется процесс физико-химического разрушения металла по границам кристаллитов (зерен) под действием агрессивной среды, при котором агрессивная среда проникает вглубь металла по границам зерен, нарушая металлическую связь между зёрнами.

В современной науке существуют четыре теории, объясняющие причины возникновения межкристаллитной коррозии.

- Обоеднение границ зерен хромом вследствие выделения по границам составляющих, богатых хромом карбидов.
- Возникновение напряжений в результате образования новых фаз по границам зерен.
- Образование по границам зерен нестойкой избыточной фазы, которая служит анодом в образующейся электрохимической системе.
- Особое расположение хромистых карбидов в виде сплошной или слабо разобщенной цепочки.

Наибольшим признанием пользуется теория локального обеднения границ зёрен хромом вследствие образования на границах богатых хромом карбидов. Суть этой теории заключается в том, что при нагреве стали в критическом интервале температур 500 - 700 С (для разных сталей этот интервал различен) происходит выпадение из твёрдого раствора (аустенита) по границам зёрен сложных карбидов железа и хрома типа $(\text{Cr Fe})_3\text{C}$ или $(\text{Cr Fe})_2\text{C}_6$. Диффузия углерода к границам протекает быстрее, чем диффузия хрома. Поэтому на образование карбидов расходуется не только имеющийся там запас углерода, но и углерод, диффундирующий изнутри зёрен. В то же время хром, необходимый для образования карбидов, поступает первоначально только с границ или приграничных зон зерна аустенита. В результате содержание хрома в приграничных участках зёрен аустенита становится менее 12,5 % (даже до 6,5 %),

что недостаточно для обеспечения их коррозионной стойкости. Условия возникновения межкристаллитной коррозии в нержавеющей сталях для аустенитного и ферритного классов различны. В закаленном состоянии нержавеющей стали аустенитного класса не склонны к ней, последующий провоцирующий отпуск в интервале 500 - 700 С вызывает межкристаллитную коррозию. Склонность аустенитных сталей к такой коррозии оценивается по продолжительности провоцирующего отпуска, который ее вызывает — ($t_{\min}$) (рисунок 1.30).

Чем больше продолжительность провоцирующего отпуска ($t_{\min}$), тем меньше склонность стали к межкристаллитной коррозии. Принято считать, что если ($t_{\min}$) больше одного часа, то сталь можно подвергать сварке и другим технологическим операциям, поскольку общее время пребывания стали в интервале температур 500 - 700 С не превышает одного часа; если ($\min t$) меньше одного часа, то сталь можно применять, но без сварки, пайки и других горячих технологических операций или после них сталь необходимо подвергать повторной закалке. Условия возникновения межкристаллитной коррозии в нержавеющей сталях ферритного класса другие и вызываются нагревом при высоких температурах (более 1000 С) и быстрым охлаждением. Дополнительный отпуск при 550 -800 С устраняет склонность к межкристаллитной коррозии.

Способы борьбы с межкристаллитной коррозией.

Ознакомившись с природой МКК и причинами, вызывающими её, можно предложить несколько способов устранения или сведения к минимуму этого явления.

1) Ввиду того, что одним из нежелательных элементов, способствующим возникновению МКК, является углерод, следует понизить его концентрацию в сталях до очень малых количеств (менее 0,02 – 0,03 %). В этом случае вероятность образования карбидов хрома по границам зёрен снижается, хром остаётся в твёрдом растворе и, как следствие, сталь не подвергается МКК.

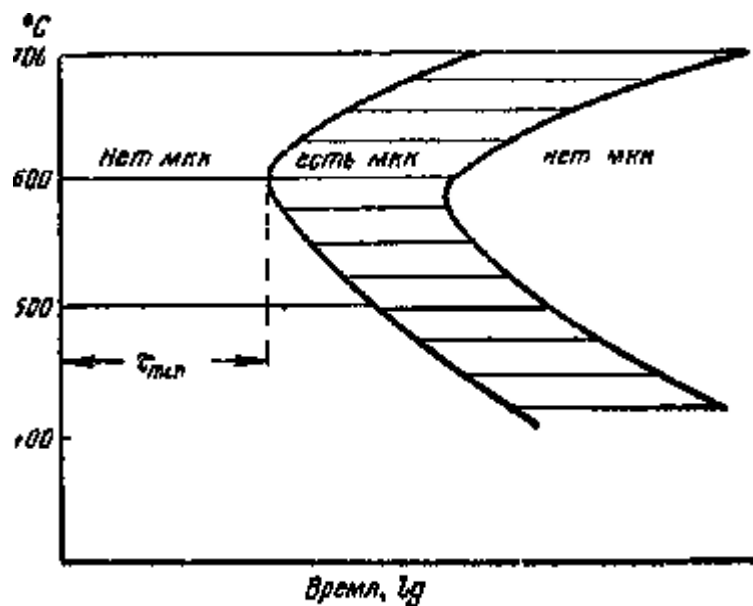


Рисунок 1.30 – С – кривые образные склонности нержавеющей сталей к межкристаллитной коррозии (МКК)

Этот способ используется весьма ограниченно из-за дороговизны таких сталей (стали 04X18H10, 03X18H10).

2) Применение заковки аустенитных сталей на чистый аустенит с температур 1100 -1150 С . Однако, следует иметь ввиду, что при последующем нагреве в область критических температур (например, нагрев околошовной зоны при сварке) такая сталь снова приобретёт склонность к МКК.

3) Введение в состав нержавеющей сталей стабилизирующих карбидообразующих элементов - титана, ниобия, тантала. Эти элементы обладают более сильным сродством к углероду, чем хром. В результате избыточный углерод стали связывается в очень стойкие карбиды (TiC , NbC) , а весь хром остаётся в твёрдом растворе. Эти карбиды исключают возможность выделения карбидов хрома и обеднения границ зёрен хромом при нагреве в критическом интервале температур. Для этой цели чаще всего используется титан. Его необходимо ввести примерно в 5-7 раз больше, чем содержание углерода в стали. Примеры таких сталей: 12X18H10T, 12X18H11Б .

Вопросы для самоконтроля

- 1) Особенности металлургических процессов при сварке.
- 2) Металлургические процессы, протекающие в сварочной ванне.

- 3) Окисление, раскисление и легирование.
- 4) Влияние кислорода, азота, водорода на свойства металла шва и качество сварного соединения.
- 5) Металлургические процессы при сварке толстопокрытыми электродами.
- 6) Рафинирование шва.
- 7) Основные физико-химические процессы при сварке под флюсом.
- 8) Формирование и кристаллизации металла шва.
- 9) Горячие трещины, причины образования, меры предупреждения.
- 10) Холодные трещины, причины образования, меры предупреждения.
- 11) Старение и коррозия металла сварных соединений.

Литература: [2], [3]

1.5 Образование сварочных напряжений и деформаций

1.5.1 Классификация, причины возникновения сварочных напряжений и деформаций

При сварке в результате теплового воздействия на металл возникают собственные напряжения.

Собственными напряжениями называются напряжения, которые существуют в изделии без приложения внешних сил.

Напряжения - величина внутренних сил, возникающие в металле, распределяемые по площади сечения.

Следствием напряжения являются деформации. *Деформация* - это изменение проектных размеров и форм, свариваемых деталей и изделий

При проектировании сварных конструкций необходимо учитывать вероятность возникновения напряжений и деформаций. Если расчетные напряжения и деформации превышают допустимые для данной конструкции, то необходимо разработать мероприятия по их предупреждению, а если появились, то устранить.

Для борьбы с напряжениями и деформациями надо знать их характер и классификацию. В зависимости от причины возникновения собственные напряжения разделяют на:

- *тепловые напряжения* — появляются в следствии неравномерного распределения температуры во время сварки (присущи малоуглеродистым и низколегированным сталям);

- *структурные напряжения* — появляются в следствии преобразования структуры во время нагревания выше критической температуры (присущи средне- и высоколегированным сталям; без тепловых не возможны);

В зависимости от времени существования напряжения бывают:

- *временные* — существуют только в момент нагрева и исчезают при охлаждении;

- *остаточные* — остаются даже после исчезновения причин их образования.

В зависимости от площади действия различают три вида напряжений:

- напряжения которые действуют в объемах конструкции (зоне всего сварного шва);;

- напряжения которые действуют в рамках зерен металла;

- напряжения которые существуют в кристаллической решетке металла.

По направлению действия напряжения и деформации бывают:

- *продольные* — вдоль оси сварочного шва;

- *поперечные* — направлены перпендикулярно оси шва.

По виду напряженного состояния напряжения бывают:

- *линейные* (одноосные) — действуют в одном направлении (по длине или ширине шва);

- *плоскостные* (двухосные) — действуют в двух направлениях (вдоль и поперек шва);

- *объемные* (трехосные) — действуют в трех направлениях (вдоль, поперек и толщине шва).

В зависимости от изменения при сварке форм и размеров детали или изделия различают:

- *деформации в плоскости*, которые могут быть: продольные, поперечные и изгиба;

- *деформации из плоскости* (угловая деформация).

1.5.2 Основные причины возникновения напряжений и деформаций

Причины образования деформаций и напряжений при сварке подразделяются на основные и побочные категории. К первым относят те, которые возникают во время сварки, поэтому неизбежны. Вторые нужно предотвращать.

Основные причины возникают как следствие:

1) *Неравномерного нагрева* сварочной зоны и прилегающих участков. Более горячий металл расширяется больше чем холодный, поэтому между слоями с разной температурой начинает концентрироваться напряженность. Ее величина определяется степенью нагрева и коэффициентом теплового расширения. Чем больше эти значения, тем выше вероятность нарушения геометрии конструкций.

2) *Усадки*. Когда при охлаждении после сварки металл переходит из жидкой фазы в твердое состояние, объем уменьшается. Этот процесс сопровождается растягиванием прилегающих участков с образованием напряжений, направленных вдоль или поперек шва. Продольное воздействие изменяет длину соединения, а поперечное способствует образованию угловой деформации.

3) *Структурных изменений*. При сварке высокоуглеродистой или легированной стали с большим нагревом происходит процесс закаливания с изменением объема и коэффициента теплового расширения. Это явление создает напряжения, приводящие к образованию трещин внутри и на поверхности швов. У сталей, в составе которых углерода меньше 0,35%, структурные изменения настолько малы, что не оказывают существенного влияния на качество сварных соединений.

1.5.3 Схема образования продольных и поперечных деформации

Если на металл действует сила, он изменяет свою форму, т.е. деформируется. При небольшой величине силы Q деформация происходит в упругой области, не вызывая необратимых изменений кристаллической решетки,

— после снятия силы кристаллическая решетка возвращается в исходное

состояние и деформация исчезает. Такие деформации называются *упругими*, или *временными*. При увеличении силы, возникающие в металле напряжения могут превысить предел текучести, что приводит к необратимым изменениям. В этом случае говорят, что произошла *пластическая* деформация металла. После снятия силы Q пластические деформации остаются. В отличие от упругих (временных) эти деформации называются *остаточными*.

Сила Q , вызывающая остаточные деформации, может быть внешней, а может возникать внутри металла при его нагреве. Рассмотрим пример нагрева стержня длиной L . Первоначально закрепим его к одной жесткой стенке (рисунке. 1.31, *а*). При нагреве он удлинится на величину

$$\Delta L = \alpha TL, \quad (1.70)$$

где α — коэффициент линейного расширения;

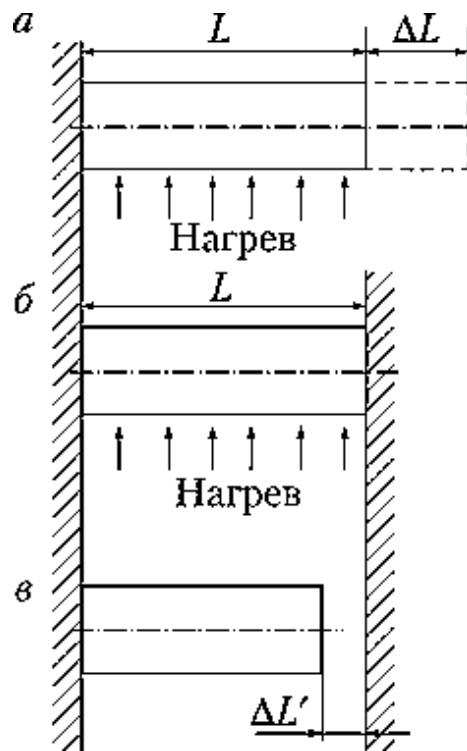
T — температура нагрева.

Удлинение происходит свободно, поэтому напряжений в стержне не возникает.

Ограничим стержень другой жесткой стенкой (рисунок 1.31, *б*) и снова нагреем. В металле снова начнут происходить процессы, приводящие к увеличению длины стержня. Однако его реальному удлинению мешает жесткая стенка, поэтому в стержне возникнут напряжения сжатия.

Однако его реальному удлинению мешает жесткая стенка, поэтому в стержне возникнут напряжения сжатия. По мере роста температуры напряжения будут увеличиваться, пока не достигнут предела текучести. При этом в стержне возникнет пластическая деформация и он укоротится. После остывания стержень станет короче первоначальной длины на $\Delta L'$ (рисунок 1.31, *в*).

Таким образом при нагреве тела, находящегося в несвободном состоянии, в нем образуются остаточные деформации в виде уменьшения его первоначальной длины.



a — нагрев в свободном состоянии; *б* — нагрев при двухстороннем ограничении; *в* — охлаждение при двухстороннем ограничении

Рисунок 1.31 – Деформация стержня при нагреве и охлаждении

Рассмотрим далее процесс образования остаточных напряжений и деформаций в результате нагрева металла при сварке. Как известно, нагрев изделия при сварке неравномерный: в зоне сварного шва металл нагрет до температуры плавления, отдаленные же от шва участки относительно холодные. Так как изменение размеров тела при нагреве пропорционально температуре, различные слои металла стремятся удлиниться по-разному.

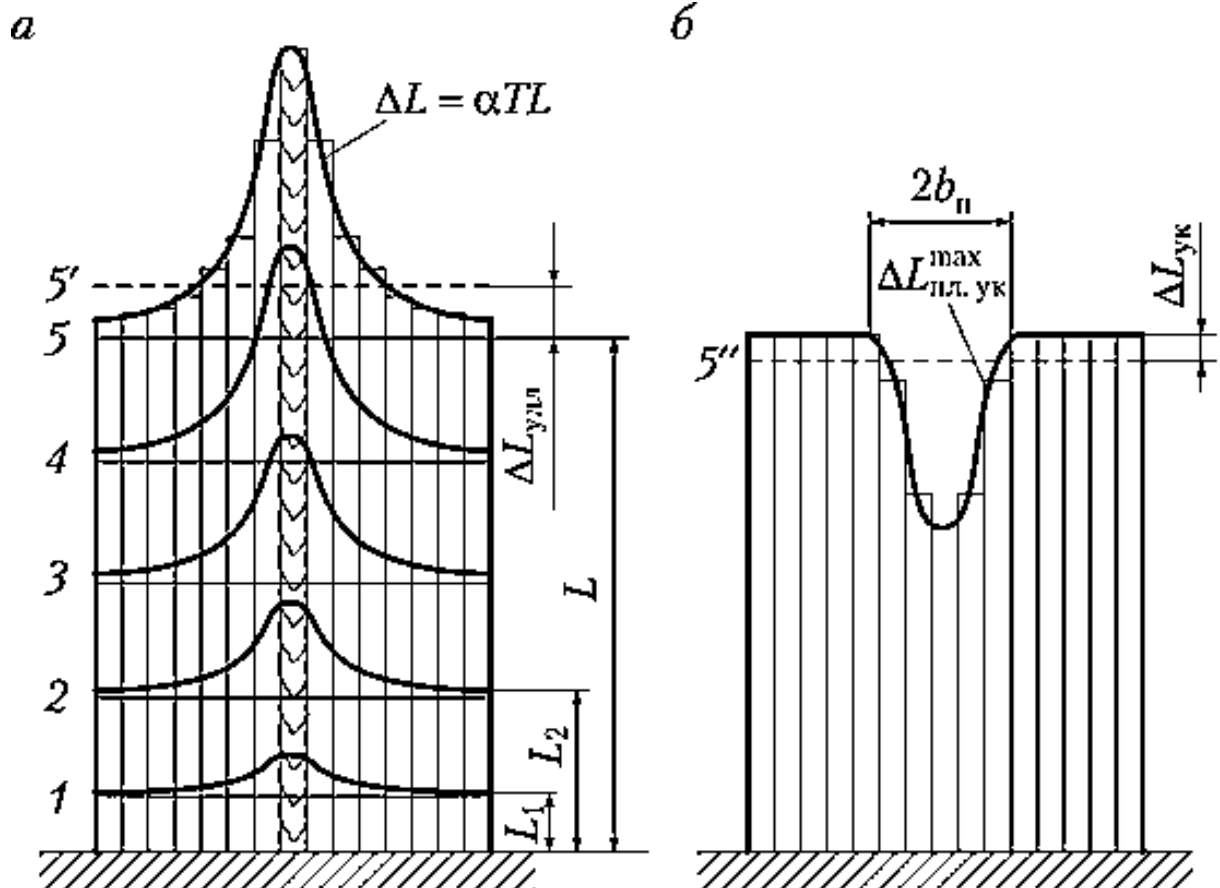
Представим себе, что перед сваркой пластины были разрезаны на узкие продольные полосы и нижним торцом оперты на какое-то основание (рисунок 1.32, *a*). Наметим ряд поперечных сечений 1-5, отстоящих от нижнего торца (основания) на различные расстояния (верхний торец — сечение 5). Учитывая известный характер распределения максимальных температур при сварке в поперечном сечении соединения, отметим, что каждая свободная полоска получит температурное удлинение, пропорциональное температуре нагрева полоски. Тогда верхний торец соединения (сечение 5) примет вид, показанный на рисунке 1.32, *a*. Температурная деформация других поперечных сечений показана

соответствующими кривыми. Чем ближе к нижнему торцу расположено поперечное сечение (например, I), тем меньше будет удлинение полосок. Положение нижнего торцевого сечения остается без изменений.

Между тем реальное сварное соединение, как известно, не состоит из отдельных, не связанных между собой полосок. Все полоски связаны друг с другом и деформируются таким образом, что сечение образца остается плоским. Поэтому крайнее верхнее сечение 5 переместится в положение 5'. Таким образом все сварное соединение при нагреве получает некоторое удлинение. Чтобы привести отдельные полоски в то состояние, в котором они должны находиться в реальном неразрезанном соединении, необходимо центральные полоски сжать, а крайние — растянуть на соответствующую величину. Поэтому на стадии нагрева в сварном соединении в продольном направлении возникают напряжения сжатия в средней высоконагретой зоне и растяжения — в остальной мало-нагретой зоне. Причем для центральных полосок соединения эти напряжения достигают предела текучести.

Значит, на стадии нагрева в средней высоконагретой области соединения в продольном направлении протекают пластические деформации сжатия (укорочения) и формируется так называемая зона пластических деформаций, ширина которой для такого симметричного соединения обычно обозначается как $2b_u$.

Если в момент максимального нагрева соединение снова расчленить на отдельные полоски, то после полного охлаждения верхний торец соединения примет форму, показанную на рисунке 1.32, б. Средние полоски будут короче остальных на величину их пластического сжатия на стадии нагрева. Однако в реальном нерасчлененном соединении все полоски связаны друг с другом, поэтому сечение переместится вниз в положение штриховой линии «5».

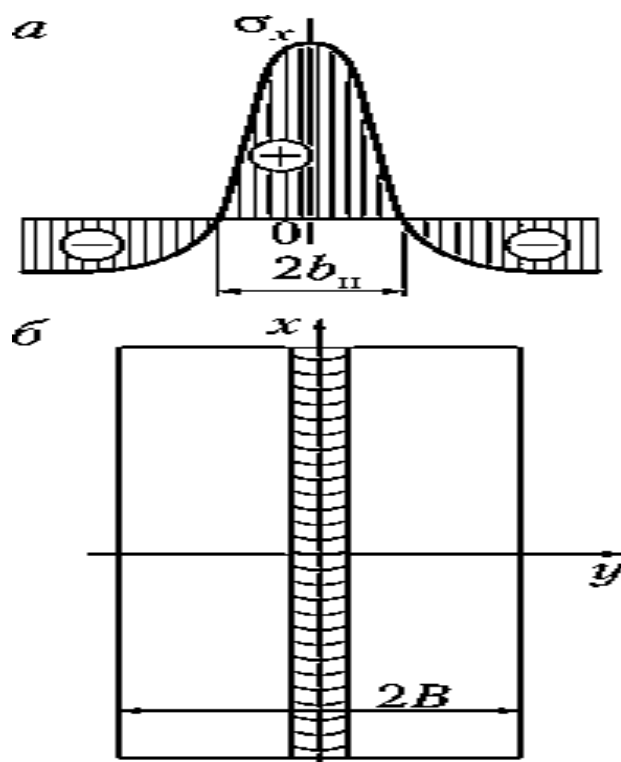


a — в процессе сварки; *б* — после охлаждения

Рисунок 1.32 – Схема образования остаточных деформаций при сварке

Таким образом, после сварки остается деформация укорочения свариваемого изделия. Говорят, что произошла усадка сварного шва. При этом центральные слои растягиваются до длины $5''$, а крайние — сжимаются до этого же положения. Поэтому центральные слои после остывания испытывают остаточные напряжения растяжения, а удаленные от шва слои — напряжения сжатия.

Распределение остаточных напряжений в зоне сварного соединения после сварки приведено на рисунке 1.33. Растягивающие напряжения в зоне шва уравниваются сжимающими напряжениями в основном металле.



σ_x — остаточное напряжение на оси x ; B — ширина изделия

Рисунке 1.33 – Распределение остаточных напряжений (а) в стыковом сварном соединении (б).

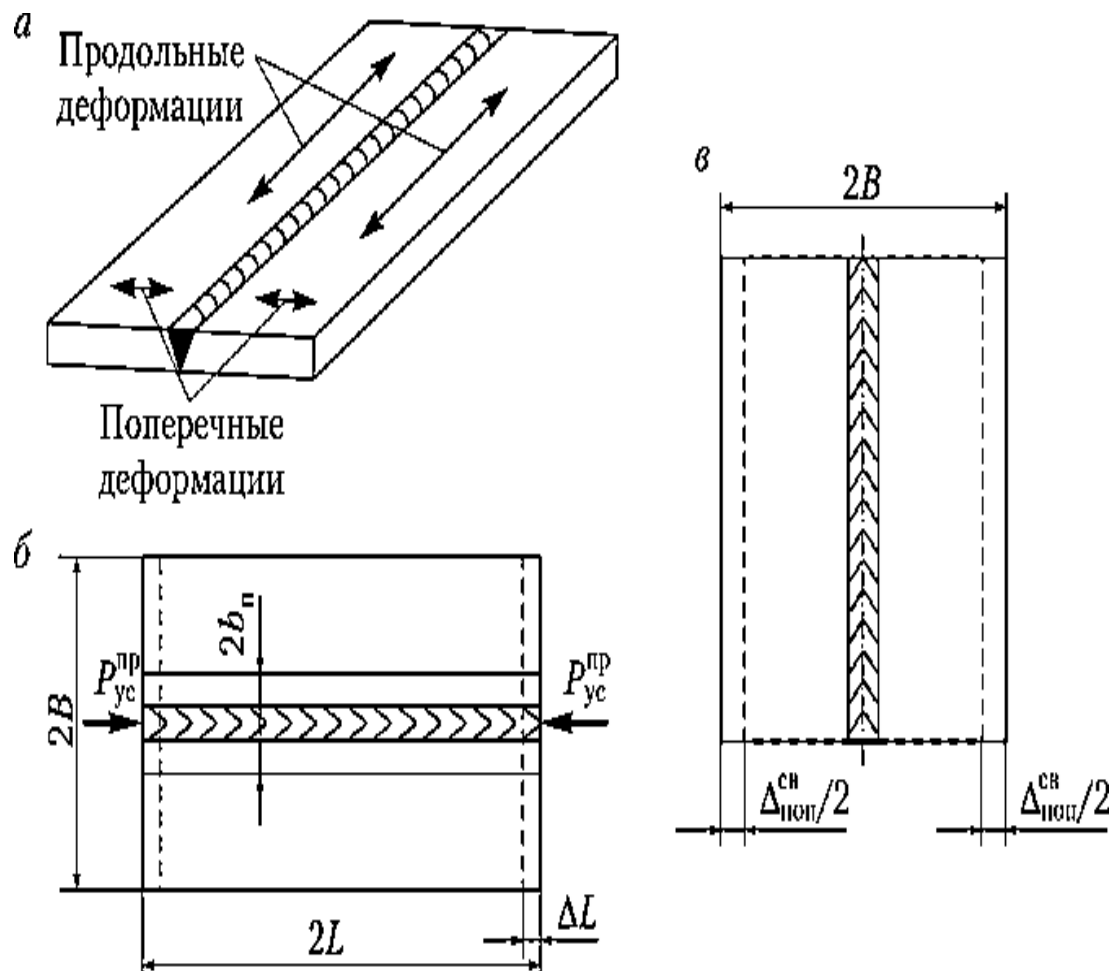
Рассмотренный процесс образования остаточных деформаций в виде перемещения отдельных слоев металла происходил вдоль сварного шва, поэтому по направлению действия эти деформации называются *продольными* (рисунок 1.34). Однако одновременно происходит не только продольная, но и поперечная усадка шва, так как нагретый металл стремится расшириться и в поперечном направлении, чему препятствуют холодные участки основного металла.

Как следствие уменьшается ширина свариваемых пластин. Деформации, происходящие поперек шва, называются *поперечными* (рисунок 1.34).

Уменьшение размеров изделия из низкоуглеродистой стали после сварки определяется выражением

$$\Delta L = 0,83 \cdot 10^{-6} \frac{q_n}{F} L, \quad 1.71$$

где q_n — погонная энергия дуги; L — длина изделия; F — площадь сечения шва.



a —временные; *б* — продольные остаточные; *в* — поперечные остаточные;

$P_{yc}^{пр}$ — продольная усадочная сила

Рисунке 1.34 – Продольные и поперечные деформации при сварке

1.5.4 Схемы образования сварочных напряжений и деформации

Деформация и напряжения при неравномерном нагреве

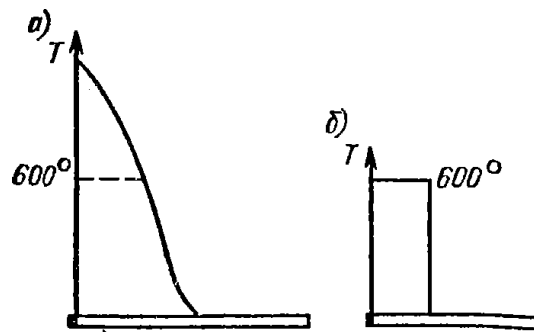
Процессы, наблюдаемые при неравномерном нагреве, рассмотрим для случая наплавки валика быстро перемещающейся дугой на кромку полосы, допуская при этом некоторые упрощения:

- 1) действительное распределение температуры при наплавке (рисунок 1.35,а) с небольшой погрешностью принимаемой по схеме (рисунок 1.35,б)
- 2) полосу по ширине можно разбить на две части: на полосу I, равномерно нагреваемую при наплавке валика и ограниченной изотермой 600°C , и полосу II, остающуюся холодной, полагая при этом, что они могут быть, и не связаны между собой. (Отношение ширины полосы I к полоске II принимаем

примерно равной 0,25). Тогда при наплавке валика на кромку полосы I, полагая не связанной с полоской II, (рисунок 1.36,а), и при нагреве её до температуры Т она удлинилась бы, и её длина оказалась бы равной

$$L_T = L_0 (1 + \alpha T); \quad (1.72)$$

где α —коэффициент линейного расширения. Длина полоски II при этом осталась бы неизменной.



α – действительное; б - схематизированное

Рисунок 1.35 – Распределение температуры при наплавке валика на кромку
полосы

Но так как нагреваемые полосы связаны между собой, то удлиняясь, первая полоса, заставит удлиняться прилегающие к ней волокна второй полосы за счет её изгиба и растяжения, Это вызовет упругие напряжения сжатия в первой полосе и реактивные упругие напряжения растяжения в полоске второй.

До тех пор, пока напряжение сжатия в первой полосе будут увеличиваться, оставаясь меньше предела текучести, изгиб полоски второй будет увеличиваться (рисунок 1.36, б). В момент, когда температура полоски первой достигнет 600°С, при которой предел текучести будет равен нулю, под действием сжимающих напряжений полоски второй, полоска первая претерпит пластическую деформацию сжатия: станет толще и примет начальную длину.

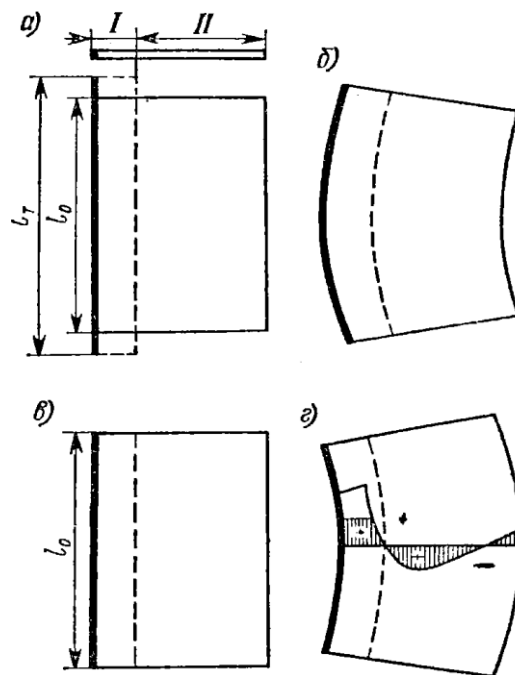


Рисунок 1.36 – Схема развития деформаций и напряжений при наплавке валика на кромку полосы.

Напряжения в полосках I и II при этом будут равны нулю (рисунок 1.36, в). При охлаждении первой полоски от 600°C до 0 , полагая её не связанной со второй полоской, она укоротилась бы до $\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot 600$. Но так как первая и вторая полоски связаны между собой, то по мере уменьшения температуры первая полоска будет укорачиваться и за счет сопротивления её укорочению полоски второй в ней будет возникать напряжение растяжения, а во второй полоске — напряжение сжатия, под действием которых будет наблюдаться изгиб полосы (рисунок 1.36, г).

В какой-то момент времени при охлаждении полоски первой, напряжения растяжения в них достигнут предела и остаточные пластические деформации сжатия, а в полоске второй — остаточные напряжения сжатия.

Учитывая, что в состоянии равновесия сумма всех напряжений равна нулю, эпюра продольных напряжений, принимая ширину полосы примерно 150мм, примет вид (рисунок 1.36, г).

1.5.5 Напряжения, возникающие вследствие структурных превращений в металле

Если свариваемая сталь склонна к закалке с образованием мартенсита, то в сварном соединении, наряду с тепловыми напряжениями, возникают объемные структурные напряжения. Причина их возникновения состоит в следующем.

Основной металл, расположенный по обе стороны от шва и нагреваемый при сварке выше определенных для данной стали (так называемых критических) температур A_{c1} и A_{c3} , претерпевает структурные превращения.

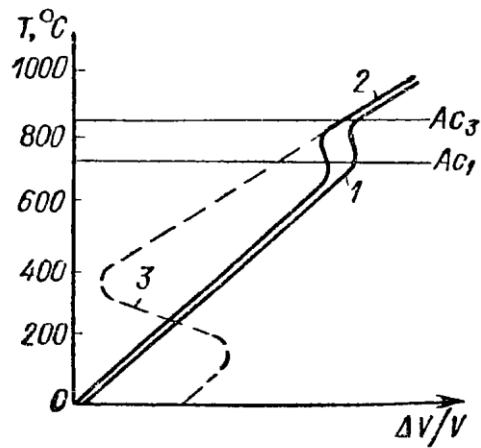
Коэффициент теплового расширения стали в интервале температур до A_{c1} составляет 0,000012, а выше A_{c1} — 0,000020. Поэтому структурные превращения при нагреве стали сопровождаются уменьшением объема, а при охлаждении — увеличением объема.

На рисунке 1.37 графически показано изменение объема стали в зависимости от температуры нагрева и охлаждения. Кривая 1 характеризует изменение объема при нагреве стали всех видов независимо от склонности к закалке, кривая 2 характеризует изменение объема при охлаждении не закаливаемых сталей, а кривая 3 — легированных закаливаемых сталей.

Как видно из рисунка, в интервале температур до A_{c1} и выше A_{c3} объем не закаливающейся стали изменяется пропорционально температуре, но с различным коэффициентом пропорциональности: в интервале температур выше 600°C до A_{c3} наблюдается скачкообразное изменение объема стали вследствие структурных превращений.

Однако благодаря тому, что при этих температурах сталь находится в пластичном состоянии и ее пределы упругости и текучести близки нулю, изменение объема не вызывает появления в ней остаточных напряжений.

Иное происходит при охлаждении высокоуглеродистых или легированных закаливаемых сталей (кривая 3). Аустенит в этих сталях склонен к переохлаждению и распадается при более низких температурах.



1 – кривая нагрева для всех сталей; 2 – кривая охлаждения для низкоуглеродистой стали; 3 – кривая охлаждения легированной стали.

Рисунок 1.37 – зависимость объемных изменений в стали при нагреве и охлаждении от температуры

В зависимости от содержания углерода и других элементов, повышающих закаливаемость стали, а также от скорости охлаждения аустенит может переохлаждаться до температур 350 и 200°C, при которых металл находится в упругом состоянии и обладает сравнительно высоким пределом текучести.

Превращение аустенита в мартенсит при этих температурах сопровождается резким увеличением объема; вследствие пониженной пластичности металла в нем возникают остаточные сжимающие напряжения, называемые в данном случае структурными. Структурные напряжения называют напряжениями высшего порядка.

1.5.6 Расчет сварочных деформаций

Деформация является наружным дефектом сварной конструкции.

В процессе проектирования сварных конструкций, зная механизм возникновения остаточных деформаций, можно рассчитать их величину. Методика расчета предложена Н. О. Окербломом, который для расчета предложил следующую последовательность:

Исходные данные для расчета:

- сила сварочного тока на дуге, I_d , А;
- напряжение на дуге, U_d , В;

- скорость сварки, $V_{св}$, м/ч.

Определяется:

1) Площадь сечения сварного шва или валика, F_n , мм²;

2) Погонная энергия при сварке, q_n , Дж/см;

$$q_n = I_d \cdot U_d \cdot \eta / V_{св}; \quad (1.73)$$

3) Относительная деформация продольной оси элемента (проводим ось через центр тяжести).

$$\Delta_{ц.т.} = 0,83 \cdot 10^{-6} \cdot q_n / F_n; \quad (1.74)$$

где $\Delta_{ц.т.}$ – относительная продольная деформация относительно центра тяжести.

4) Остаточное укорочение, мм;

$$\Delta L = \Delta_{ц.т.} \cdot L; \quad (1.75)$$

где L – общая длина элемента (полосы), см;

ΔL – общее укорочение свариваемой конструкции в зоне сварного шва, мм.

5) Кривизна сварной конструкции, 1/см;

$$C = 0,83 \cdot 10^{-6} \cdot q_n \cdot Z / I; \quad (1.76)$$

где Z – расстояние от центра тяжести сварного узла до оси сварного шва, см;

I – момент инерции поперечного сечения сварной конструкции.

6) Стрела прогиба сварной конструкции, см;

$$f = C \cdot L^2 / 8; \quad (1.77)$$

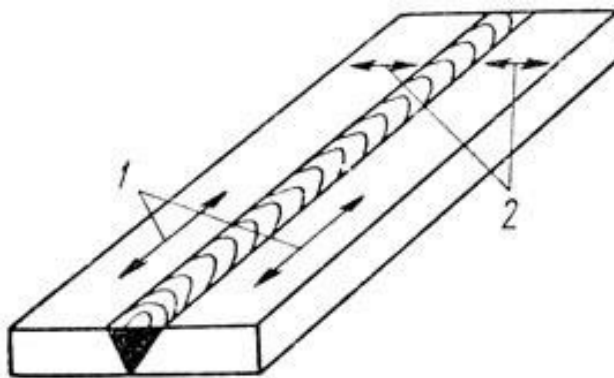
Вывод: результатом расчетов сварочной деформации является определение:

- а) укорочение конструкции в зоне сварного шва – ΔL ;
- б) стрела прогиба сварной конструкции – f .

1.5.7 Деформации и напряжения при сварке стыковых и тавровых соединений

Деформации и напряжения при сварке стыковых соединений

По продолжительности сварочные напряжения делят на технологические и остаточные. Первые возникают во время сварки (в процессе изменения температуры), вторые — после окончания сварки и полного охлаждения изделия. По направлению действия различают продольные, расположенные параллельно оси шва, и поперечные, расположенные поперек оси шва, линейные сварочные напряжения (рисунок 1.38). Распределение продольных напряжений при сварке в стыковом шве таково, что на его концах из-за возможности свободной усадки они незначительны, а в средней части имеют достаточно большую величину, достигают предела текучести (рисунок 1.39). При сварке встык продольные сокращения шва вызывают не только продольные, но и поперечные напряжения, поскольку деформированные («изогнутые») листы стремятся распрямиться. Потому в средней части сваренных листов возникают напряжения растяжения, а по краям — напряжение сжатия.



1 — продольные, 2 — поперечные

Рисунок 1.38 – Напряжения в стыковом соединении

При разработке технологического процесса сварки обязательно следует учитывать поперечную и продольную усадку шва» При сварке металла толщиной до 6 мм главным образом возникают значительные деформации. При этом остаточные напряжения бывают небольшими, так как металл уже деформировался.

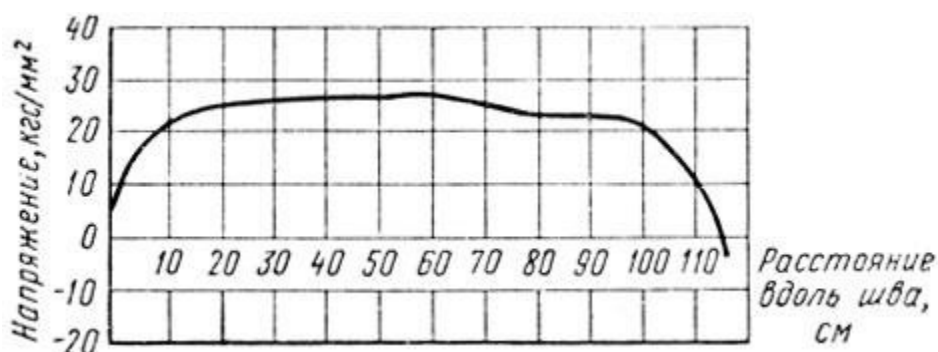


Рисунок 1.39 – Характер распределения остаточных напряжений по длине стыкового шва

Напряжения и деформации при сварке тавровых соединений

При изготовлении сварных тавров, состоящих из двух листов, вследствие продольных и поперечных напряжений, а также укорочений возникают деформации стенки и пояса тавра.

Деформации сварочного тавра, как и стыкового соединения, зависят от многих факторов:

- 1) от соотношения размеров стенки и пояса;
- 2) от последовательности наложения швов;
- 3) от погонной энергии и др.

Схема деформации сварного тавра показана на рисунке 1.40, из которого видно, что деформация стенки тавра подобна деформации полосы, на кромку которой наплавляется валик. Эти деформации по существу и определяют направление изгиба и общие деформации стенки и пояса, который, кроме того, получает деформацию из своей плоскости.

Для упрощения из всех возможных деформаций в вертикальной плоскости, пользуясь известной методикой определения продольных напряжений в стыковых соединениях.

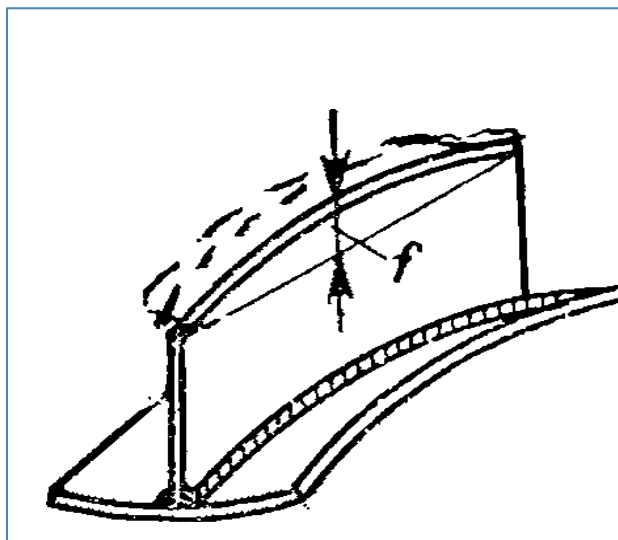


Рисунок 1.40 – Вид деформированного сварного тавра

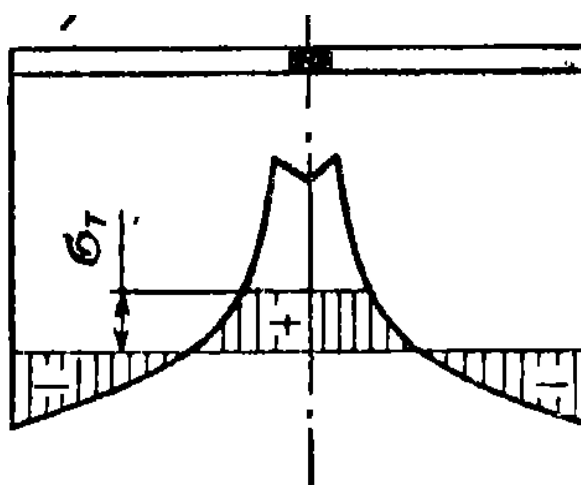


Рисунок 1.41 – Сварка встык двух полос равной ширины

Продольные напряжения при сварке встык двух полос разной ширины зависят от соотношения ширины свариваемых листов, а продольные напряжения в сварных таврах – от соотношения размеров стенки и пояса тавра. Чем больше ширина вертикальной стенки и тоньше пояс, тем больше эпюра продольных напряжений сварного тавро приближается к эпюре, получающейся при наплавке валика на кромку полосы. Чем больше толщина пояса или меньше высота стенки

тавра, тем больше эпюра продольных напряжений сварного тавра приближается к эпюре для случая сварки встык двух полос равной ширины (рисунок 1.41).

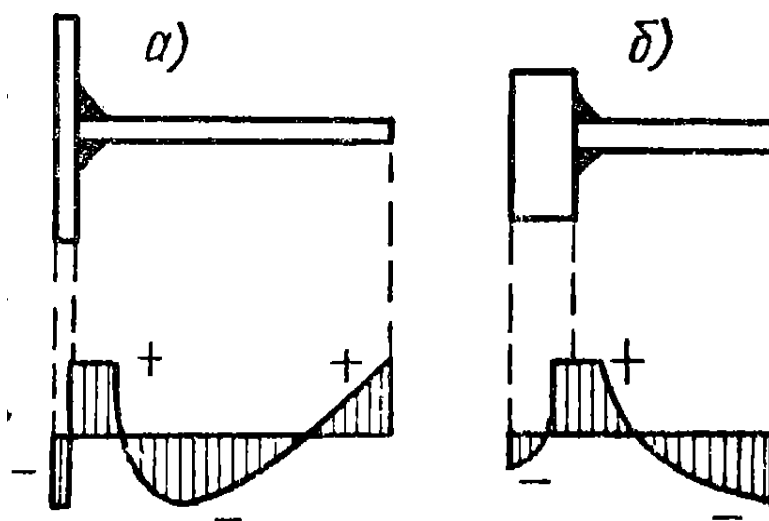


Рисунок 1.42 – Эпюры продольных напряжений в тавровом сечении

Руководствуясь изложенным, построим эпюры продольных напряжений для двух сварных тавров; в одном случае для тавра с высокой стенкой и тонким поясом, в другом – для тавра с низкой стенкой и толстым поясом (рисунок 1.42). В первом случае (рисунок 1.42, а) прогиб вертикальной стенки такой, что наружная кромка имеет выпуклость и продольные напряжения растяжения. Наружная поверхность пояса имеет напряжения сжатия, а в зоне шва напряжения равны пределу текучести растяжения и имеются пластические деформации растяжения. Во втором случае (рисунок 1.41,б) наружная обшивка стенки получает вогнутость и продольные напряжения сжатия. Прилегающая к наружной поверхности часть сечения пояса также имеет напряжения сжатия, а в зоне шва, как и в первом случае, напряжения равны пределу текучести растяжения, и пластические деформации вследствие большой жёсткости системы больше, чем в первом случае. Но вследствие относительно больших пластических деформаций сжатия при нагреве, при охлаждении длина балок после их сварки и охлаждения будет меньше начальной длины.

1.5.8 Организационные мероприятия по уменьшению напряжений и деформаций при сварке

К конструкционным (организационным) методам относятся:

- правильно подобрать режимы сварки;
- соблюдать технологическую последовательность сварки;
- проектировать конструкцию так, чтобы максимальное количество швов выполнять с двух сторон;
- проектировать конструкцию так, чтобы в ней было минимальное количество пересекающихся и швов сходящихся в одной точке;
- по возможности применять узловую сборку и сварку;
- уменьшение количества вводимой при сварке теплоты за счет уменьшения количества сварных швов и объема наплавленного металла;
- симметричное расположение сварных швов для уравнивания деформаций;
- уменьшение использования накладок и косынок;
- применение стыковых соединений вместо других, где это возможно.

1.5.9 Технологические мероприятия по уменьшению напряжений и деформаций при сварке

1) Последовательность выполнения швов зависит от их длины.

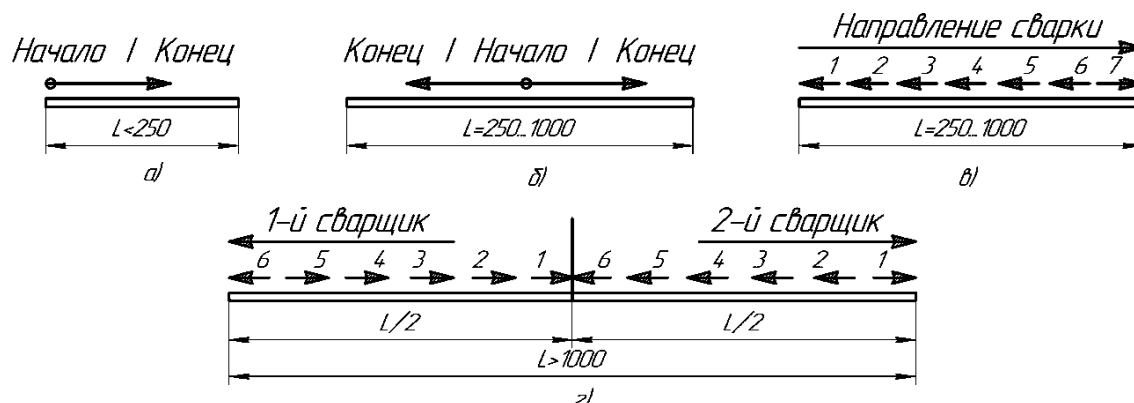
По протяжённости сварные швы делят на три основные группы:

- короткие швы до 250 мм свариваемые за один проход;
- средние швы от 250 до 1000 мм рекомендуется варить от середины к концам или обратно ступенчатым методом;
- длинные швы свыше 1 метра рекомендуется варить от середины к краям, обратно ступенчатым способом или комбинирова двумя сварщиками.

Последовательность наложения сварных швов разной протяженности на рисунке 1.43.

При обратно ступенчатом способе сварки сварной шов делят на участки длиной по 150-200 мм, каждый участок варят в направлении, обратном общему направлению сварки. В зависимости от количества проходов (слоёв),

необходимых для выполнения проектного сечения шва, различают однопроходный (однослойный) и многопроходный (многослойный) швы.



а) на проход; б) от середины к концам; в) обратно ступенчатым методом; г) от середины к концам обратно ступенчатым способом, двумя сварщиками

Направление сварки указана стрелками: 1-5 – последовательность сварки в каждом слое.

Рисунок 1.43 - Последовательность наложения сварных швов разной протяженности

2) Способ уравнивающих деформаций. Стараются симметрично располагать ребра жесткости в конструкциях и сводят их количество к минимуму. Симметричность необходима и при расположении сварных швов, так как это уравнивает возникающие деформации (рисунок 1.44), т. е. последующий слой должен вызывать деформации, противоположные тем, которые развились в предыдущем слое.

3) Способ обратных деформаций. В производственных условиях для устранения коробления часто применяют предварительный обратный изгиб свариваемых деталей. Этот способ используют для преодоления угловых деформаций при сварке стыковых и нахлесточных соединений.

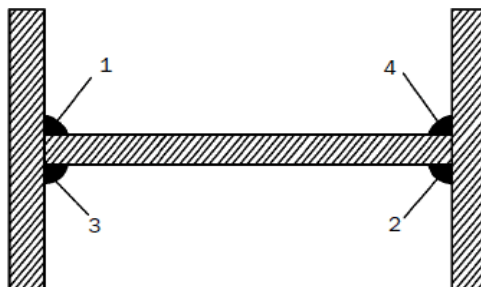


Рисунок 1.44 – Последовательность наложения сварных швов для уравнивания деформаций.

При сварке листов небольшой ширины с V-образной разделкой кромок их располагают не в одной плоскости, а под углом в сторону, обратную ожидаемой деформации (рисунок 1.45).

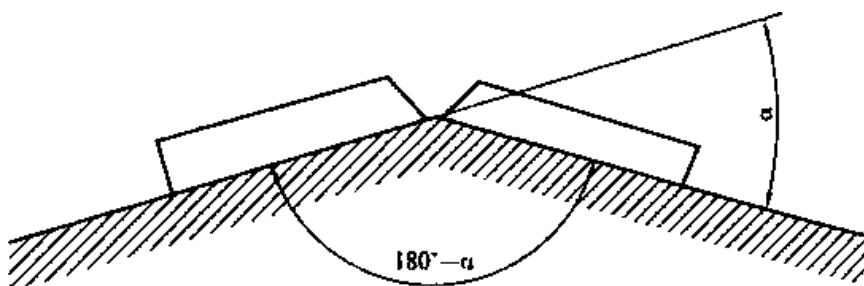


Рисунок 1.45 – Схема сборки деталей, свариваемых в стык, для предотвращения угловой деформации.

Эффективен и способ обратных деформаций профилей (рисунок 1.46). Перед сваркой в конструкции (как правило, швы в ней должны располагаться с одной стороны относительно оси либо на различных расстояниях от нее) вызывают деформацию, обратную той, что возникнет в ней при сварке.

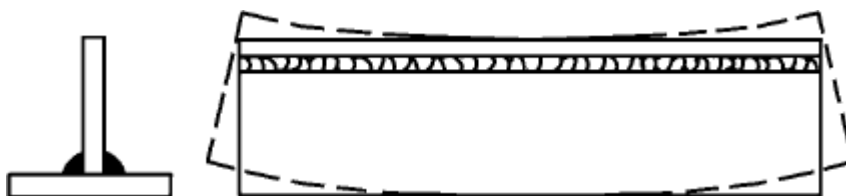
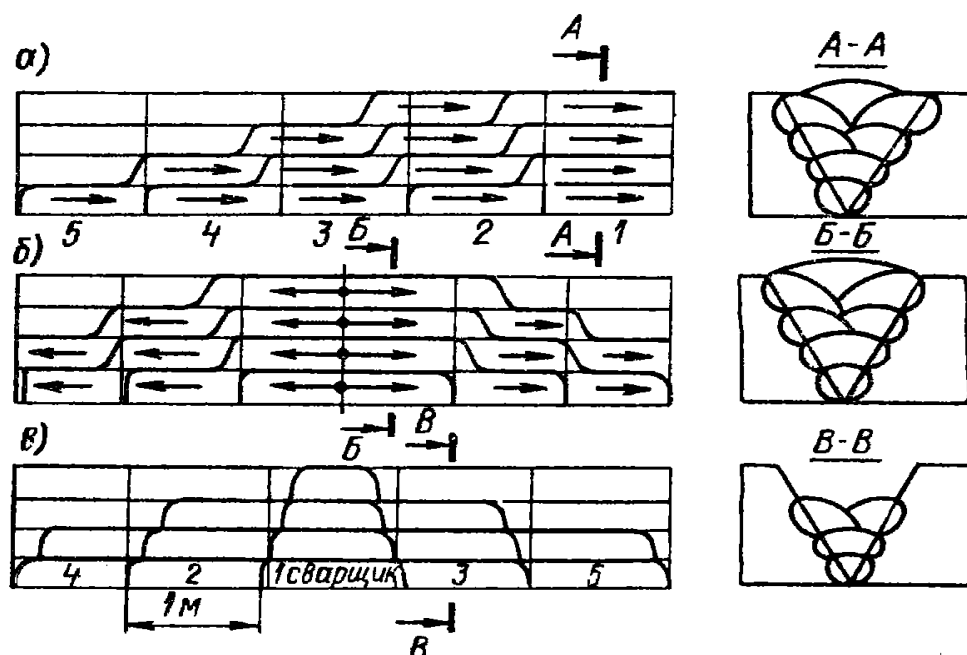


Рисунок 1.46 – Сваривание гнутых профилей как пример применения обратной деформации

4) Способы сварки толстолистного металла. При соединении частей из металла значительной толщины (более 20–25 мм) применяют многослойную дуговую сварку, выполняя швы каскадом или горкой (рисунок 1.47, а, б). Шов горкой накладывается следующим образом: первый слой имеет длину примерно 200–300 мм, второй длиннее первого в 2 раза, третий длиннее второго на 200–300 мм и т. д. Достигнув «горки», сварку продолжают в обе стороны от нее короткими валиками. Такой способ способствует поддержанию участка сварки в нагретом состоянии. В результате тепло распространяется по металлу более равномерно, что снижает напряжения.



а – каскадом; б – горкой; г – блочный

Рисунок 1.47 – Очередность наложения швов при многослойной дуговой сварке

При сварке блоками каждый участок (примерно в 1 м) желательно выполнять отдельным сварщиком одновременно от середины шва к краям (рисунок 1.47, в). Направление слоев (проходов) на каждом участке желательно менять. Такое одновременное выполнение много-проходного шва по длине и сечению обеспечивает наиболее равномерное распределение температур, что значительно уменьшает общие остаточные деформации свариваемого изделия.

5) Метод жесткого закрепления перед сваркой. Для борьбы с деформациями детали закрепляют в кондукторе, применяя прижимные скобы, по контуру конструкцию прихватывают к стенду, укладывают грузы.

6) Метод искусственного охлаждения свариваемых деталей водой. Применяют для особо ответственных деталей и при наплавке.

7) Рациональная последовательность наложения швов. В основу положено то, что каждый накладываемый шов должен связывать минимальное количество деталей (две).

1.5.10 Методы снятия внутренних напряжений и исправления полученных сварочных деформаций

1) Способы устранения напряжений

Напряжения устраняют отпуском или механическими методами. Отпуск является самым эффективным методом снятия напряжений. Его применяют, когда к изделию предъявляются повышенные требования к точности геометрических размеров.

Он может быть общим или местным. Чаще всего отпуск производят при 550-680 °С. Выделяют три его стадии: нагрев, выдержка, остывание.

Из механических способов устранения напряжений применяют проковку, прокатку, вибрацию, обработку взрывом, приводящие к пластической деформации обратного знака.

Проковку делают пневмомолотком, а виброобработку специальным устройством вызывающим вибрацию изделия с резонансной частотой в пределах 10-120 Гц в течение нескольких минут.

При сварке сталей, склонных к закалке и образованию трещин, применяют предварительный подогрев изделий и термообработку сварного шва. Для изделий из углеродистой стали в тех случаях, когда необходимо только снять внутренние напряжения и улучшить механические свойства шва, достаточен нагрев до 600°С и охлаждение сварного шва.

Одним из вариантов снятия напряжения является высокотемпературный отпуск. Техническое мероприятие применяется во время сочленения углеродистых сплавов. Оно осуществляется за счет нагрева до 630-650 °С. После

выдержки температуры, длящейся 2-3 минуты на 1 мм толщины стали, деталь охлаждается.

2) Способы исправления полученных сварочных деформаций

Сварочные деформации чаще устраняют после сварки, чем предупреждают их перед сваркой или в процессе сварки. Это, по-видимому, объясняется не только тем, что возможности способов, применяемых до сварки или в процессе сварки, ограничены, но также и организационно-техническими причинами, так как организовать правку после завершения сварки, когда деформации уже известны, значительно проще. Способы, используемые после сварки, следующие:

- создание путем пластической деформации перемещений, обратных сварочным (изгиб, растяжение, проковка, прокатка роликами).

- создание пластических деформаций укорочения путем местного нагрева.

Этот прием широко используется в производстве и довольно эффективен .

- устранение деформаций путем высокого отпуска деталей в зажимных приспособлениях.

Дефекты устраняют термическим с местным или общим нагревом, холодным механическим, термомеханическим способами. Для правки термическим методом с полным отжигом конструкцию закрепляют в устройстве, которое создает давление на искривленный участок, затем нагревают в печи.

Способ локального нагрева основан на сжатии металла при остывании. Для исправления дефектов искривленное место греют горелкой или сварочной дугой. Так как прилегающие участки остаются холодными, зона нагрева не может значительно расшириться. После охлаждения растянутый участок выпрямляется.

Термическим способом выправляют любые виды деформаций, однако при работе с тонкостенным металлом следует учитывать его особенности:

- тепло при местном нагреве тонких стальных листов быстро распространяется по всей площади, поэтому величина усилия сжатия оказывается недостаточной для исправления дефекта;

- температура локального нагрева тонкостенного металла не должна превышать 600 — 650⁰С, поскольку при увеличении температуры начнется образование пластических деформаций даже при отсутствии напряжения.

При механической правке растянутые участки деформируются внешними нагрузками в обратном направлении. Дефекты устраняют применением изгиба, вальцовки, растяжения, ковкой, прокаткой роликами.

Термомеханическую правку проводят с подогревом растянутого участка до 700 — 800⁰С и внешнего воздействия. Для выправления участков с большим растяжением сначала из избытков металла холодной рихтовкой формируют выступы в форме куполов. Затем по отдельности нагревают и резко охлаждают.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Причины возникновения сварочных напряжений и деформаций.
- 2) Напряжения, возникающие вследствие структурных превращений в металле.
- 3) Организационные мероприятия предотвращения или уменьшения остаточных деформаций.
- 4) Технологические мероприятия предотвращения или уменьшения остаточных деформаций.
- 5) Методы снятия внутренних напряжений.
- 6) Способы исправления деформированных деталей.

Литература: [3], [2]

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Дедюх, Р. И. Технология сварочных работ: сварка плавлением : учебное пособие для среднего профессионального образования / Р. И. Дедюх. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 169 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-03766-1. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/453936>

2 Куликов В.П. Технология сварки плавлением и термической резки : учебник / В.П. Куликов. — Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2016. — 463 с. : ил.

3 Маслов В. И. Сварочные работы. Учебное пособие / В. И. Маслов – Москва: Издательство Академия, 2020. – 285с. ISBN 978-5-9729-0453-2

4 Фетисов, Г. П. Сварка и пайка в авиационной промышленности : учебное пособие для среднего профессионального образования / Г. П. Фетисов. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 229 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-05769-0. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/454064>

5 Черепяхин, А. А. Технология сварочных работ : учебник для среднего профессионального образования / А. А. Черепяхин, В. М. Виноградов, Н. Ф. Шпунькин. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 269 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-08456-6. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL <https://urait.ru/bcode/453937>

6 ГОСТ 2246-70 Проволока стальная сварочная.

7 ГОСТ 9087-81 Флюсы сварочные.

8 ГОСТ 8050-85 Сварочная двуокись углерода газообразная и жидкая.

9 ГОСТ 9467-75 Electroды покрытые металлические для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей. Типы.

10 ГОСТ 9466-75 Electroды покрытые электрические для ручной дуговой сварки сталей и наплавки.

11 ГОСТ 10052-75 Electroды покрытые металлические для ручной дуговой сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами. Типы.

