



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Материаловедение

Лекция 8: Общие вопросы сварки и наплавки

Часть I. Теория

Семенова Елена
Инженер-проектировщик 1 категории

07.11.2024



Сварка – технологический процесс получения неразъемных соединений путем установления межатомной и межмолекулярной связи между свариваемыми частями детали при нагреве места контакта или пластической деформации или того и другого одновременно. Сварка - еще один способ изготовления конструкций взамен литых, также сварку применяют для исправления дефектов и восстановления, вышедший из строя деталей.

Физической основой процесса сварки является образование прочных связей между атомами или молекулами на поверхности соединяемых заготовок.

Для получения сварного соединения соединяемые поверхности необходимо **сблизить на расстояния**, в пределах которых начинают действовать межатомные силы сцепления, **обеспечить необходимую температуру, время контакта и качество поверхности**. Для этого определенным образом требуется активизировать свариваемые поверхности путем введения определенной энергии. Энергия может быть сообщена в виде теплоты, упруго-пластической деформации, электронного, ионного, ультразвукового облучения.



Сварка осуществима при следующих условиях:

- применении очень больших удельных давлений сжатия деталей, без нагрева
- нагревании и одновременном сжатии деталей умеренным давлением
- нагревании металла в месте соединения до расплавления, без применения давления для сжатия

Т.о. все разновидности сварки можно отнести к трем основным группам:

- сварка давлением (механический класс, сварка в твердом состоянии)
- сварка плавлением (термический класс, сварка в жидком состоянии)
- сварка плавлением и давлением (термомеханический класс, сварка в жидкотвердом состоянии)
- пайка

В настоящее время различают более 150 видов и способов сварочных процессов, подробнее можно ознакомиться в **ГОСТ 19521-74**.

Для ознакомления с основными понятиями и терминами: **ГОСТ 58904 (ISO/TR 25901-1:2016); ГОСТ 2601-84**

Чтобы разогреть металл до температуры плавления, используют разные источники энергии: электрическую дугу, газовое пламя, лазерное излучение, электронный луч, трение, ультразвук и пр.

В процессе сварки можно выделить несколько этапов:

- подготовка свариваемых деталей: нарезка заготовок, разметка, при необходимости очистка поверхности и подготовка кромок, сборка
- собственно сварка
- удаление образовавшегося в процессе сварки шлака и зачистка сварных швов
- контроль качества

Виды сварки



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ





Сварка давлением — сварка, при которой в области контакта двух металлических поверхностей происходит деформация, в результате чего образуется сварное соединение. Осуществляется за счёт взаимодействия атомов металлов (объединения электронных оболочек) двух свариваемых поверхностей. При этом материал в зоне соединения, как правило, нагревают для снижения сопротивления деформации.

Качество самой сварки может зависеть от многих факторов:

- уровень приложенных усилий
- качество подготовленных поверхностей
- способность металла подвергаться деформации

Давление, прилагаемое к соединяемым частям, создает значительную пластическую деформацию металла по кромкам свариваемых деталей, и он начинает течь. Металл перемещается вдоль поверхности раздела, унося с собой поверхностный слой с загрязнениями и пленками адсорбированных газов. В тесное соприкосновение вступают выходящие на поверхность свежие слои и образуют одно целое. В процессе деформации происходит смятие неровностей, разрушение окисных пленок, в результате чего увеличивается площадь соприкосновения чистых поверхностей. Возникновение межатомных связей приводит к прочному соединению деталей. На процесс соединения сильно влияют загрязнения поверхности металлов (окислы, жировые пленки и пр.).

При сварке плавлением детали по соединяемым кромкам оплавляются под действием источника нагрева. Оплавленные поверхности кромок, образуют жидкую сварочную ванну. При охлаждении сварочной ванны жидкий металл затвердевает и образует сварной шов.

При сварке плавлением происходят значительные изменения в химическом составе наплавленного металла и в его структуре

Сварка плавлением имеет наибольшее распространение.

Сварка плавлением



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Дуговая сварка

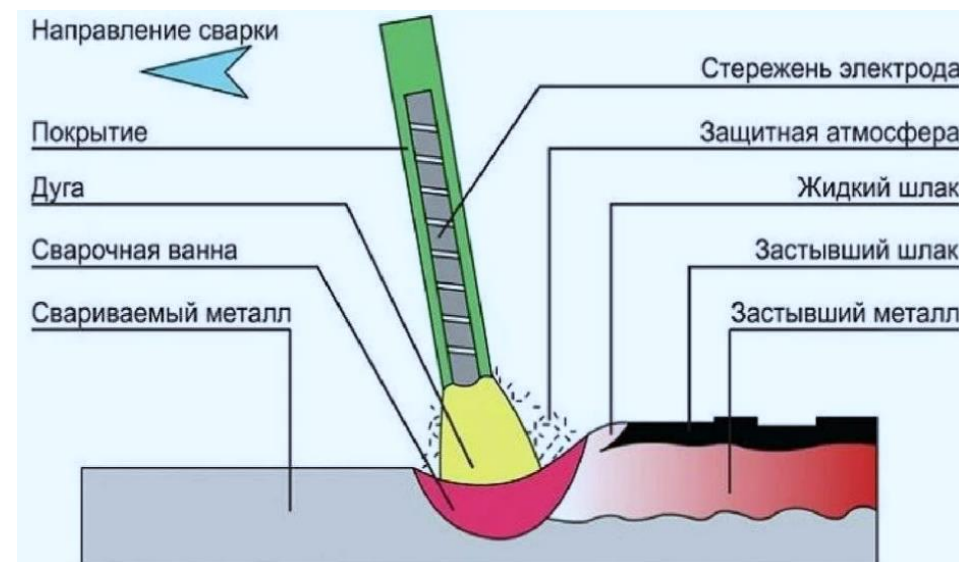
Тепло для локального плавления металла заготовок выделяется при горении электрической дуги между электродом и заготовками. Для зажигания кратковременно касаются электродом поверхности, затем отводят на расстояние 2 — 5 мм. Чем короче дуга, тем выше ее температура.

Для соединения деталей используют следующие методы сварки:

- **ручную**, когда все манипуляции с электродом выполняет сварщик
- **полуавтоматическую** с подачей электродной проволоки механизмом, установленным в аппарате
- **автоматическую**, когда процесс выполняется по заданному алгоритму без вмешательства человека

Дуговой вид выполняется плавящимися и неплавящимися угольными или вольфрамовыми электродами с введением присадочной проволоки в рабочую зону.

Для защиты расплавленного металла от соприкосновения с воздухом механизированные способы проводят под флюсом или в среде инертного газа



Основные способы сварки плавлением



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ



Основные способы сварки



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Газовая сварка

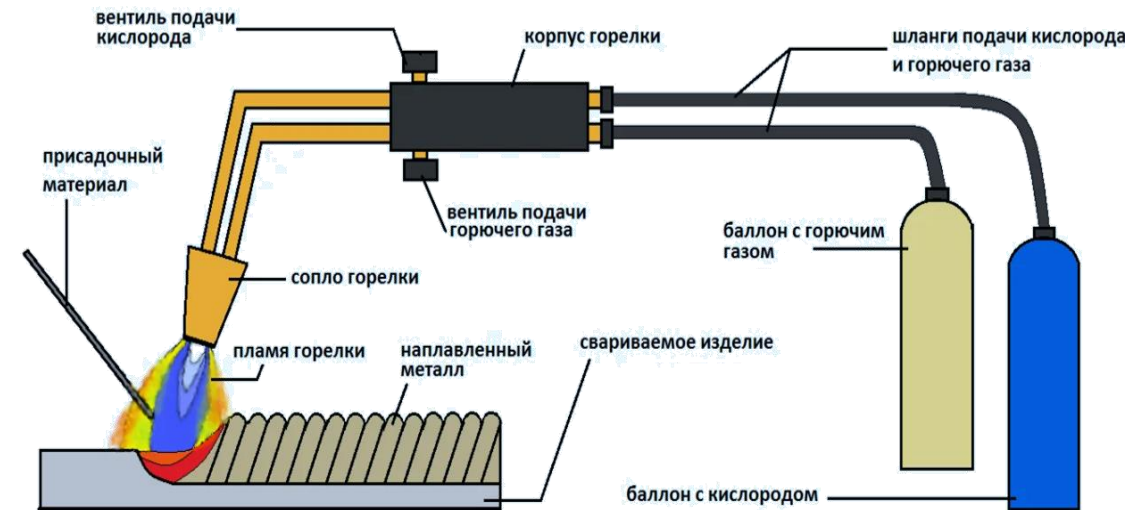
Сущность процесса газовой сварки заключается в том, что свариваемый и присадочный **металлы расплавляются в пламени, получаемом при сгорании** в чистом кислороде ацетилена, пропана, водорода, паров бензина или керосина, развивая температуру в два раза выше температуры плавления металла. При нагревании газосварочным пламенем кромки свариваемых заготовок расплавляются, а зазор между ними заполняется присадочным металлом, т.е. шов формируется за счет плавления присадочного материала.

В отличие от дугового вида при газовой сварке нагрев и охлаждение материала происходит более медленно. Поэтому этим методом проще сваривать тонкостенную сталь, цветные металлы, проводить наплавку.

Независимость от электроэнергии позволяет работать в полевых условиях.

Недостатки:

- низкая скорость нагрева и большое рассеивание тепла (сравнительно низкий КПД), из-за этого практически невозможно сваривать металл толщиной свыше 5 мм
- слишком широкая зона термического влияния, то есть зона нагрева
- себестоимость: цена расходуемого ацетилена при газосварке выше, чем цена электроэнергии, затраченной на тот же объем работы
- слабый потенциал механизации: из-за своего принципа действия фактически может быть реализована только ручная газовая сварка, полуавтоматический метод невозможен, автоматический — только с применением многопламенной горелки, и только при сварке тонкостенных труб либо иных резервуаров



Основные способы сварки

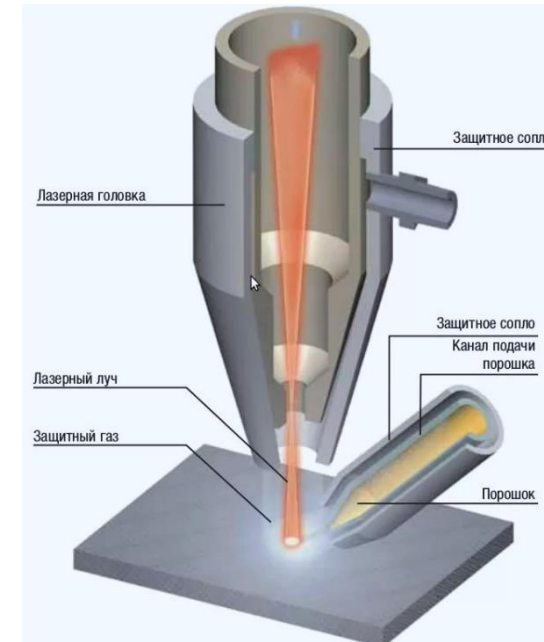


АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Лучевая и лазерная сварка

Технология основана на **плавлении материала деталей световым лучом** лазера или потоком электронов, создаваемого электронной пушкой. Чтобы луч не рассеивался, электронно-лучевая сварка проводится в вакуумной камере.

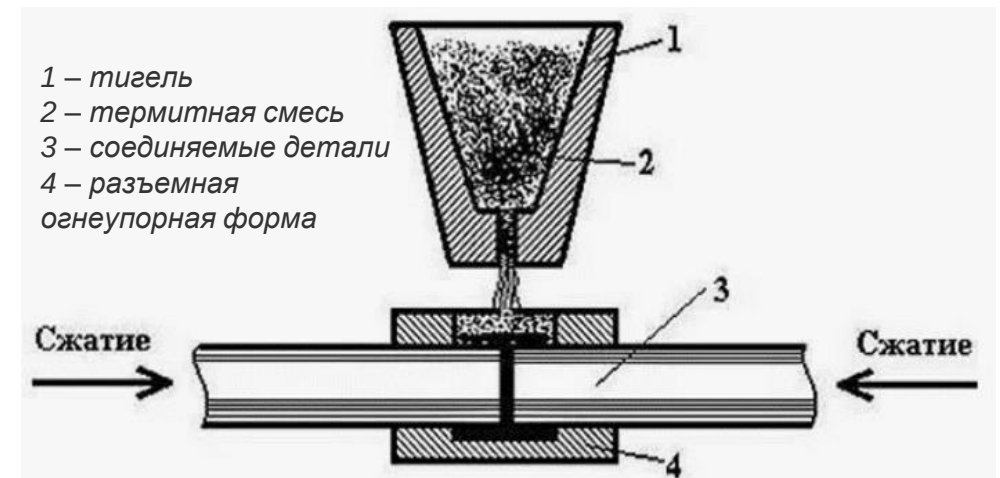
Лазерная сварка позволяет накладывать швы с высокой точностью. При этом, практически не нагреваются прилегающие поверхности, что исключает деформирование даже очень тонкого материала. Процесс рекомендуется проводить в среде инертного газа.



Термитная сварка

Для сварки этого вида используют порошкообразную смесь (термит), состоящую из алюминия, магния, окислов железа. При сгорании образуется тепло, которое расплавляет кромки заготовок. Расплавленный термит смешивается с металлом деталей, после кристаллизации образуется соединение. Для запуска процесса термит дистанционно поджигают пиропатроном, электрическим разрядом, бикфордовым шнуром. Температура горения смеси достигает 2700 °С, которой достаточно для сварки металлов.

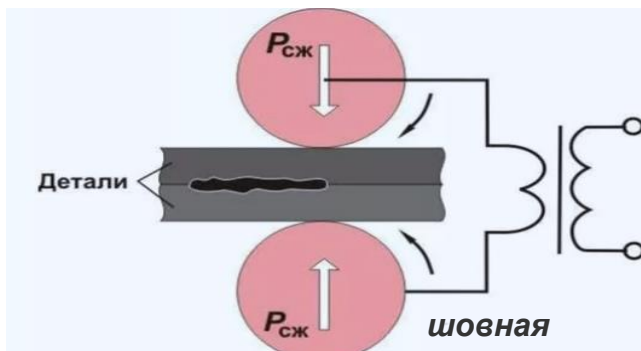
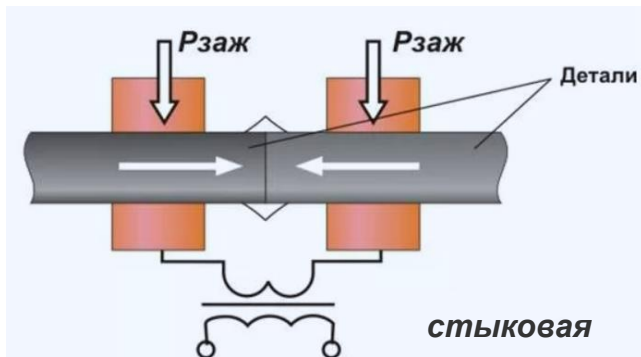
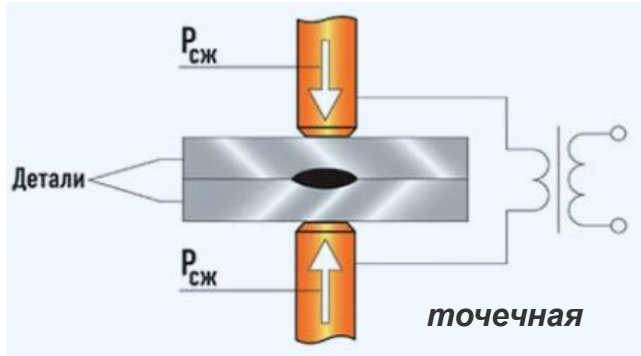
Свариваемые детали помещают в огнеупорную форму, а в установленный сверху тигель засыпают термит. При горении термита развивается высокая температура (более 2000 °С).



Основные способы сварки



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ



Контактная сварка

Металл нагревают током, проходящим через место соприкосновения заготовок, затем сжимают или осаживают. Этот вид легко автоматизируется и широкоприменим.

В зависимости от решаемых задач различают следующие виды:

- **точечную**: детали зажимают между электродами, после подачи тока в месте сдавливания образуется точечное соединение
- **стыковую**: нагрев всей площади соприкосновения соединяемых деталей
- **рельефную**: на соединяемые плоскости предварительно наносят выступы (рельефы), после подачи тока рельефы деформируются, поверхность выравнивается, образуя соединение
- **шовную**: детали соединяют внахлест роликовыми электродами

Точечную сварку проводят стержнями, шовную – роликами.

Основные способы сварки



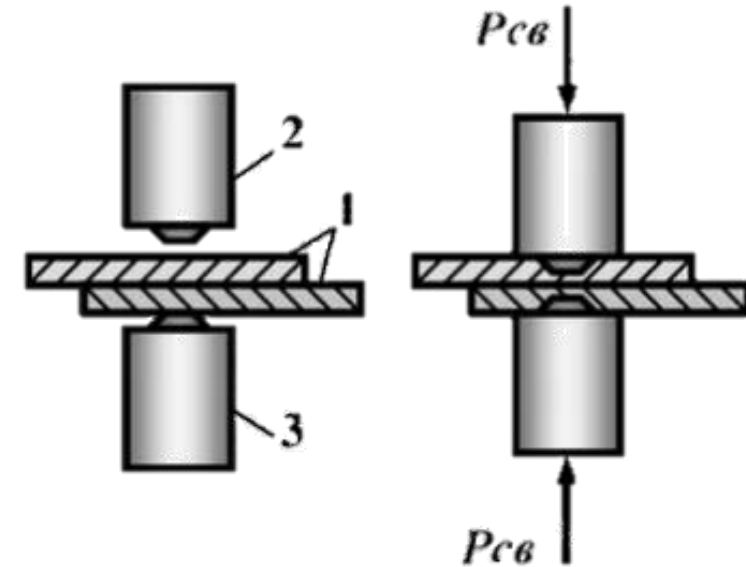
АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Холодная сварка

В основу технологии заложен принцип сжатия деталей пуансонами с усилием $1 \div 3$ ГПа.

При точечной сварке пуансон вдавливают в заготовку до образования пластической деформации, что способствует появлению межатомных связей и созданию соединения между деталями. Сварку выполняют простым сжатием или со сдвигом деталей после сдавливания **без проведения электрического тока (без нагрева)**. Прочность соединения зависит от качества подготовки места стыка, степени сжатия, характера воздействия (вибрационное либо статичное).

После пластической деформации металл становится тверже, поэтому прочность шва выше, чем у заготовок. Холодный вид соединения применяют для работы с алюминием, медью, цинком, серебром и другими металлами с низкой температурой плавления.



1 – соединяемые детали;
2, 3 – пуансон;
P – приложенная нагрузка

Основные способы сварки



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Сварка трением

Технология входит в список перспективных разработок.

Одну из соединяемых заготовок крепят неподвижно, другая, прижатая к ней, вращается. Данный вид сварки включает следующие подвиды:

- с перемешиванием: выполняется на оборудовании, оснащенном инструментом вращения с двумя элементами — основанием и наконечником. Соединение создается методом выдавливания с последующим перемешиванием
- радиальная: стыковка труб во вращающемся кольце между торцами
- штифтовая: заполнение/ремонт небольших сквозных повреждения. На месте дырки просверливают круглое отверстие, в которое вставляют вращающийся штифт из такого же металла что и основной
- линейная, без вращения: заготовки трут одна о другую до оплавления стыкуемых поверхностей, затем повышают усилие сдавливания
- инерционная: заготовки двигают за счет энергии предварительно раскрученного маховика



Пайка

Пайка — процесс соединения металлических деталей, находящихся в твердом состоянии при помощи более легкоплавкого сплава, называемого припоем. Между расплавленным припоем и основным металлом происходят на небольшой глубине процессы взаимного растворения и диффузии, в результате которых при застывании получается прочное соединение деталей

Основные способы сварки



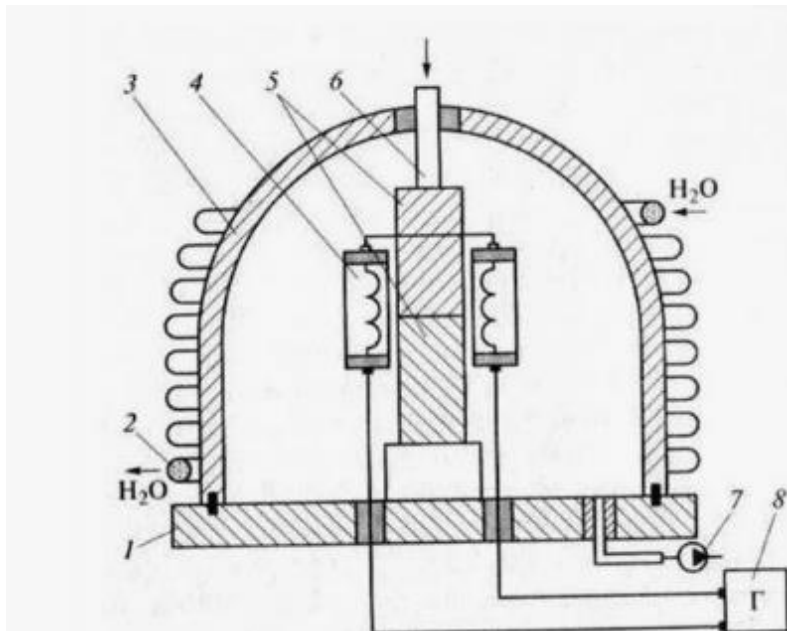
АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Диффузионная сварка

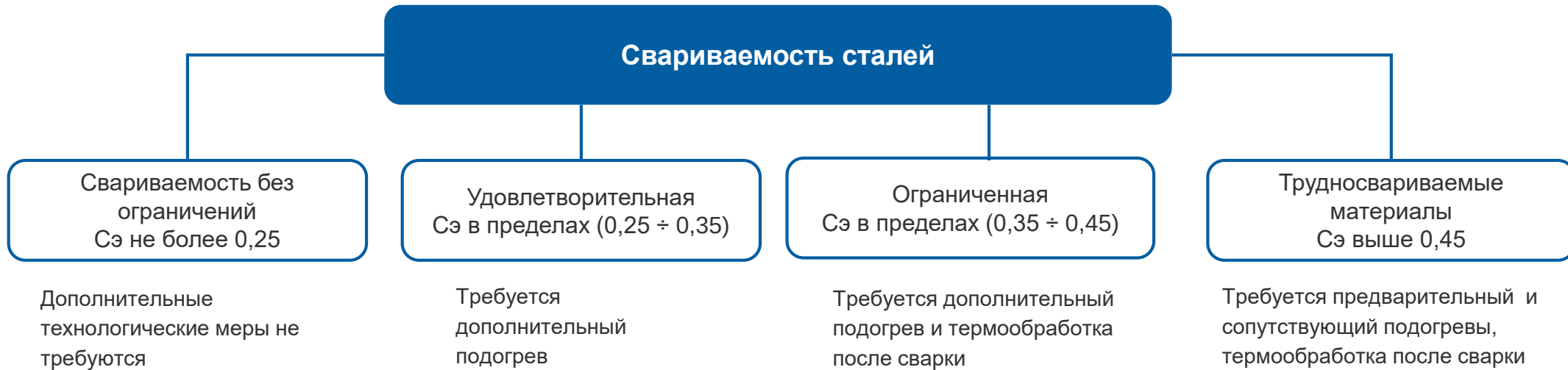
Технология основана на взаимном проникновении (диффузии) атомов материалов, если их плотно прижать один к другому. При нагреве скорость обмена частицами увеличивается.

Сварку проводят в вакуумной камере или среде инертного газа. Детали сжимают с усилием не меньше 20 МПа, поверхностные слои нагревают электротоком до температуры близкой к точке плавления. Для надежного сцепления заготовки оставляют в этом положении на некоторое время, не отключая ток.

Эти виды сварки выполняют за счет энергии трения, взрыва, давления, ультразвука. При их воздействии выделяется тепло, достаточное для плавления материала.



- 1 – плита
- 2 – змеевик для подачи воды
- 3 – водоохлаждаемая камера
- 4 – индуктор ТВЧ
- 5 – заготовки
- 6 – шток поршня
- 7 – насос
- 8 – генератор
- – давление поршня



$$[C]_э = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15},$$

На свариваемость сталей главное влияние оказывают углерод и легирующие элементы. Чем больше содержание углерода в стали, тем хуже свариваемость, больше опасность трещинообразования, труднее обеспечить равномерность свойств сварного соединения. **Стали с содержанием углерода до 0,35 % свариваются хорошо**, а далее, с повышением содержания углерода, свариваемость снижается из-за появления в околошовной зоне закалочных структур и газовых пор вследствие выгорания углерода.



Разница между металлами, обладающими хорошей или плохой свариваемостью, состоит в том, что последние, для получения качественных сварных соединений, должны свариваться по более сложной технологии (например, с предварительным и сопутствующим подогревом; с последующей термообработкой сварных изделий, в некоторых случаях в специальных камерах с контролируемой атмосферой или в вакууме; иногда с предварительной наплавкой кромок и термообработкой перед сваркой и т.д.).

Под хорошей свариваемостью понимают возможность получения сварных соединений, равнопрочных с основным металлом, без трещин и снижения пластичности как в металле шва, так и в околошовной зоне **при обычной технологии сварки, без применения специальных приемов** (например, предварительный подогрев). При этом все зоны сварочного соединения должны обладать стойкостью против перехода в хрупкое состояние при рабочих температурах наравне с основным металлом.

При сварке **однородных металлов** в месте соединения, как правило, образуется структура, близкая к структуре соединяемых заготовок. В этом случае свариваемость оценивается как хорошая или удовлетворительная.

В процессе сварки **разнородных материалов** в зависимости от степени их взаимной растворимости в соединении могут образовываться твердые растворы, химические и интерметаллические соединения. Механические и физические свойства соединений могут существенно отличаться от свойств свариваемых материалов. При этом высока вероятность образования несплошностей в виде трещин и несплавлений. Свариваемость в этом случае оценивается как ограниченная или плохая.



Низкоуглеродистые (содержание углерода до 0,3 %) и некоторые низколегированные стали обладают хорошей свариваемостью и соединяются большинством видов сварки без особых трудностей.

Углеродистые и легированные стали с содержанием углерода 0,35 % и более (сталь 45, 30ХГСА, 40ХНМА и др.), как правило, претерпевают закалку в ЗТВ. Поэтому для сварных соединений этих сталей характерна склонность к образованию в этой зоне холодных трещин, которые появляются при насыщении металла водородом. Для обеспечения хорошей свариваемости этих сталей при дуговой сварке рекомендуют предварительный, сопутствующий и последующий прогрев заготовок до температуры $(100 \div 300) ^\circ\text{C}$, а также прокалку флюсов, электродов и осушение защитных газов. Контактную сварку этих сталей выполняют на режимах, обеспечивающих подогрев заготовок и замедленное охлаждение после сварки.

При сварке высоколегированных коррозионностойких сталей на режимах, обуславливающих продолжительное пребывание металла в области температур $(500 \div 800) ^\circ\text{C}$, возможна потеря коррозионной стойкости металла шва и ЗТВ.

При дуговой сварке для предупреждения межкристаллитной коррозии соединений рекомендуется технологический процесс с использованием минимально необходимой погонной энергии, тепловой энергии, затрачиваемой на образование шва и с применением теплоотводящих подкладок, уменьшающих время пребывания металла при высоких температурах. Кроме того, последующая закалка сварных заготовок обеспечивает растворение образовавшихся в процессе сварки карбидов хрома и фиксирует чисто аустенитную структуру.

При дуговой сварке аустенитных сталей возможно образование в швах горячих трещин. Образованию трещин способствуют широкий интервал кристаллизации, наличие вредных примесей и крупнозернистая столбчатая макроструктура шва. Аустенитные стали хорошо свариваются контактной сваркой при повышенном давлении.

Общие требования к процессу сварки



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

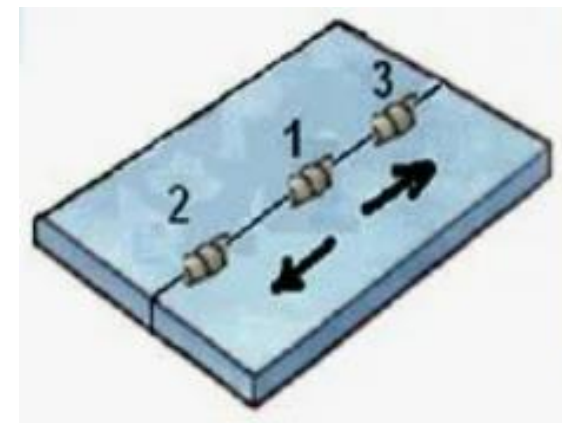
Под технологией сварки понимается совокупность способов, приемов, режимов, позволяющая получить сварное изделие с требуемыми свойствами.

Сварка стальных конструкций и отдельных узлов должна производиться **только после проверки правильности их сборки**. При сборке деталей под сварку нужно следить за тем, чтобы кромки правильно располагались одна относительно другой, чтобы выдерживались установленные зазоры, не было перекосов и т. д.

Непосредственно перед сваркой необходимо **очистить место сварки**, при этом продукты очистки из зазоров между собранными деталями следует удалить. Загрязненная поверхность кромок металла приводит к плохому провару и образованию в сварном шве неметаллических включений. Поэтому перед сваркой кромки, а также прилегающие участки на ширину (20 ÷ 30) мм должны очищаться до металлического блеска от окалины, ржавчины, масла, краски и других загрязнений. Очистка от окалины, краски и масла может осуществляться непосредственно пламенем сварочной горелки.

Для того чтобы в процессе сварки установленные зазоры и положение деталей не изменялись, перед сваркой делают предварительную прихватку деталей, т. е. свариваемые детали соединяют друг с другом в нескольких местах короткими швами. Длину прихваток и расстояние между ними выбирают в зависимости от толщины свариваемого металла и длины шва.

При сварке тонкого металла и коротких швах длина прихваток может быть не более 5 мм. При сварке толстого металла и значительных длинах швов длина прихватки может быть (20 ÷ 30) мм при расстоянии между ними (300 ÷ 500) мм. Прихватку следует производить на тех же режимах сварки, что и сварку самого шва, тщательно проваривая участок прихватки. В случае сварки деталей значительной толщины прихватка может заполнять разделку примерно на 2/3 ее глубины. Порядок постановки прихваток имеет важное значение, особенно при сварке длинных швов. Наложение шва поверх прихваток допускается только после зачистки их от шлака, а мест сварки - от брызг.



Технологичность сварных заготовок



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Технологичность сварных заготовок обеспечивается:

- выбором корректного сварочного материала
- выбором типа сварного соединения
- формой и размером свариваемых элементов
- выбором вида сварки
- мероприятиями по уменьшению сварочных деформаций и напряжений

Выбор материала

Три важных условия при выборе сварочных материалов:

- получение плотных беспористых швов
- получение металла шва, обладающего высокой технологической прочностью, не склонного к образованию горячих трещин
- получение металла шва, имеющего требуемую эксплуатационную прочность
- получение металла шва, обладающего комплексом специальных свойств

При выборе марки материала для свариваемых заготовок необходимо учитывать не только эксплуатационные свойства, но и технологические мероприятия, обеспечивающие хорошую свариваемость, учитывать возможности появления дефектов и предыдущий опыт. Естественное появление и вероятностное распределение дефектов, характерных для определенных типов металла и сварки, должны учитываться при проектировании наряду с прочностными характеристиками металла. Практика показывает, что в любом металле (кромке шва) и в сварном шве имеются хотя бы небольшие несовершенства, несплошности.

Для получения сварных соединений, равноценных по работоспособности основному металлу, при конструировании сварных заготовок следует **по возможности выбирать однородные (одного структурного класса) свариваемые материалы**. Для малогабаритных изделий возможно применение металлов с пониженной свариваемостью.

Выбор материала



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Первое условие: получение плотных беспористых швов. Для этого необходимо принимать меры как к ограничению поглощения металлом ванны водорода и азота, так и к торможению реакции окисления углерода в период кристаллизации сварочной ванны.

Второе условие: получение металла шва, обладающего высокой технологической прочностью, т.е. не склонного к образованию горячих трещин.

Химический состав металла шва оказывает решающее значение на состав межзеренных прослоек и, соответственно, на стойкость шва против образования горячих трещин. Сера, углерод и другие элементы, образующие в сталях прослойки легкоплавких эвтектик, затвердевающие при относительно низких температурах, увеличивают склонность металла шва к образованию горячих трещин. Марганец повышает технологическую прочность швов, связывая серу в тугоплавкое соединение MnS и улучшает качество сварного соединения.

Увеличение содержания **серы** в наплавленном металле до $(0,035 \div 0,040) \%$ часто приводит к образованию горячих трещин.

Повышение содержания **углерода** в шве сильно увеличивает опасность образования горячих трещин, вызываемых серой. Так, при сварке углеродистых сталей повышение содержания углерода свыше $0,16\%$ приводит к появлению горячих трещин даже при малых количествах серы и достаточно высокой концентрации марганца. Подобно углероду, но в меньшей степени, на технологическую прочность влияет кремний.

В исходном состоянии металл шва имеет структуру литого металла, состоящего из пластичного феррита и твердых включений карбидов (цементита). Феррит обладает малой прочностью и высокой пластичностью. Цементит при практически нулевой пластичности обладает высокой твердостью. Объем, занимаемый карбидной фазой, зависит от содержания углерода.

Стремятся, чтобы углерод в металле шва не превышал $0,12\%$.

Карбидообразующие элементы можно расположить в следующем порядке по убывающей степени их влияния на образование горячих трещин: титан, ванадий, вольфрам, молибден, хром, марганец.

Необходимые механические характеристики металла шва получают путем легирования его такими элементами, которые, повышая прочность, позволяют сохранить достаточно высокие пластичность и ударную вязкость.

Выбор материала



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Марганец, кремний и никель сильно упрочняют феррит. Упрочняющее **действие хрома, молибдена и вольфрама** выражено значительно слабее. Легирование вольфрамом и молибденом сильно снижает ударную вязкость. Легирование кремнием вызывает резкое снижение ударной вязкости лишь при содержании его более 0,5%. Марганец и хром при содержании их до 1%, а никель до – 3% повышают ударную вязкость.

Введение от 1 до 2% **никеля** повышает прочность металла шва при сохранении пластичности. Введение никеля свыше 2% сопровождается резким усилением дендритной неоднородности и снижает пластичность и ударную вязкость.

Хром снижает пластичность и ударную вязкость металла шва.

Марганец при содержании до 1,2% повышает ударную вязкость. Введение до 1,5% марганца повышает прочность при сохранении достаточной пластичности. Увеличение марганца свыше 1,5% приводит к резкому снижению ударной вязкости как при комнатных, так и при отрицательных температурах.

Введение более 0,5% **кремния** снижает ударную вязкость при комнатной температуре и значительно повышает температурный порог перехода металла шва в хрупкое состояние.

Например, при сварке низкоуглеродистых низколегированных конструкционных сталей в металле шва по условиям обеспечения высокой технологической и эксплуатационной прочности должно содержаться небольшое количество углерода (до 0,12 – 0,14%), кремния до 0,5% (обычно 0,1 – 0,4%) и марганца до 1,5% (обычно 0,65 – 1,2%).

Выбор материала



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Третьим условием при выборе сварочных материалов является получение металла шва, имеющего **требуемую эксплуатационную прочность** (принцип равнопрочности). Если металл шва обладает более высоким пределом прочности, то разрушение произойдет по основному металлу. Если предел прочности металла шва меньше, чем основного металла, то разрушение произойдет по сварному шву независимо от его пластичности.

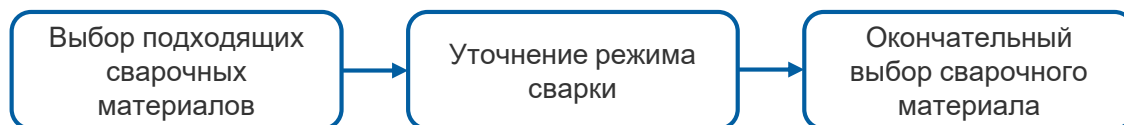
Таким образом при выборе сварочных материалов необходимо учитывать, что для обеспечения высоких эксплуатационных свойств сварного соединения следует применять такие материалы, при использовании которых металл шва получится не только с высокими показателями прочности: **предел прочности металла шва должен быть не ниже предела прочности основного металла**, но и достаточно пластичным.

Четвертым условием при выборе сварочных материалов является получение металла шва, обладающего **комплексом специальных свойств** (например, высокой коррозионной стойкостью, жаропрочностью, износостойкостью и др.).

Так, например, при сварке хромоникелевых аустенитных сталей металл шва для сохранения жаропрочности или коррозионной стойкости должен по своему составу быть близким к составу свариваемой стали. Однако хромоникелевая аустенитная структура металла шва склонна к образованию горячих трещин.

Одним из радикальных методов повышения стойкости высоколегированного хромоникелевого металла аустенитного класса против образования горячих трещин является получение двухфазной аустенитно-ферритной структуры.

Выбор материалов для наплавки слоев с особыми свойствами производят исходя из условий эксплуатации изделия. В этом случае ограничивать содержание углерода и других элементов, увеличивающих склонность к образованию горячих и холодных трещин, не представляется возможным. Тогда главным способом предупреждения трещин при наплавке износостойких сталей и сплавов является предварительный подогрев изделия.



Выбор способа уменьшения сварочных деформаций и напряжений



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Изменения формы и размеров заготовок при сварке, вызванные сварочными деформациями, приводят к снижению их точности и назначению больших припусков на механическую обработку резанием. Одновременно с развитием сварочных деформаций в изделиях образуются остаточные сварочные напряжения. Они представляют собой систему внутренних сил, находящихся в равновесии. В процессе последующей механической обработки сварного соединения напряжения перераспределяются, что сопровождается упругими и пластическими деформациями в дополнение к деформациям, полученным ранее в процессе сварки. Например, в результате механической обработки резанием сварных заготовок с высоким уровнем остаточных напряжений могут произвольно изменяться размеры и форма изделия.

Уменьшение сварочных деформаций и напряжений может быть реализовано на этапах конструирования и изготовления заготовок.

Выбор формы и размеров свариваемых элементов



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

При проектировании сварных конструкций необходимо учитывать следующее:

- количество и длина сварных соединений должны быть минимальными, при этом следует отдавать предпочтение прямолинейным и непрерывным швам
- форма и взаимное расположение соединяемых элементов должны обеспечивать удобство доступа сварного инструмента в зону сварки
- необходимо избегать пересечения швов в одном узле и сводить к минимуму количество наплавленного металла
- в зоне сварки не должно быть ступенчатых переходов по толщине, несимметрично расположенных элементов. В противном случае возможно разрушение конструкции в результате концентрации напряжений
- размеры сварных заготовок должны соответствовать возможностям их обработки в термических печах и на металлорежущих станках

Основным результатом рационального выбора формы и размеров соединяемых элементов соединения является уменьшение массы сварных изделий, трудоемкости и себестоимости их изготовления.

Уточнение вида сварки



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Выбор вида сварки осуществляется исходя из:

- размера и формы соединяемых заготовок
- типа сварного соединения
- расположения швов в изделии
- возможности механизации и автоматизации процесса сварки
- свариваемостью материала заготовок
- степенью ответственности изделия
- производительностью сборочно-сварочного процесса

Для сварки толстолистовых конструкций из стали всех марок и некоторых цветных сплавов широко применяют дуговую и электрошлаковую сварку.

В производстве тонколистовых конструкций из сталей и цветных металлов для нахлесточных соединений наиболее распространены точечная и шовная контактная сварка.

Изготовление конструкций из алюминиевых, магниевых, титановых сплавов и высоколегированных сталей требует надежной защиты зоны сварки от взаимодействия с газами атмосферы, которая обеспечивается в условиях дуговой сварки под флюсом, аргонодуговой, электронно-лучевой и диффузионной сварки.

Кроме того, при выборе вида сварки **стремятся к снижению температуры и времени нагрева ЗТВ, предотвращению химического взаимодействия между разнородными заготовками, а также к уменьшению зоны нагрева и объема расплавленного металла.** Поэтому при переходе от дуговой сварки к лучевым видам (лазерная, электронно-лучевая) и к сварке в твердом состоянии значительно уменьшается деформация сварных соединений.



Под режимом сварки понимают совокупность показателей, определяющих характер протекания процесса сварки.

Выбор режима ручной дуговой сварки часто сводится к **определению диаметра электрода и силы сварочного тока**. Скорость сварки и напряжение на дуге устанавливаются самим сварщиком в зависимости от вида сварного соединения, марки стали, марки электрода, положения шва в пространстве и т. д.

Параметры режима сварки делятся на основные и дополнительные.

К основным параметрам режима сварки относят:

- величину, род и полярность тока
- диаметр электрода
- напряжение
- скорость сварки
- величину поперечного колебания конца электрода

К дополнительным параметрам относят:

- величину вылета электрода
- состав и толщину покрытия электрода
- начальную температуру основного металла
- положение электрода в пространстве (вертикальное или наклонное)
- положение изделия в процессе сварки

Структурное строение сварных швов



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Особенностью металлургических процессов при сварке плавлением являются **весьма высокие температуры** и кратковременность всех процессов, что и приводит к изменению структуры металлов в зоне термического влияния (ЗТВ).

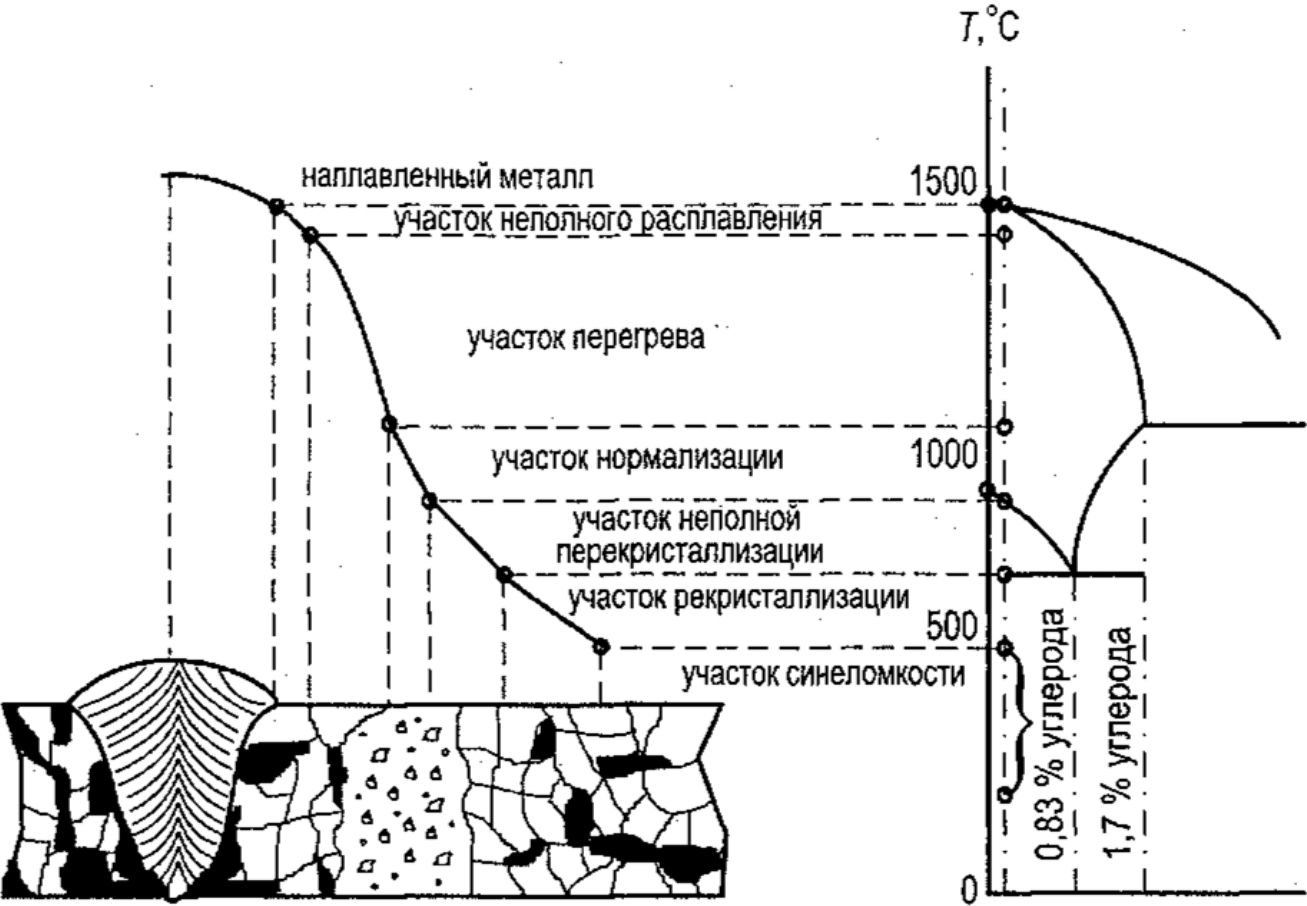
На свойства сварного соединения наряду с химическим составом металла шва значительное влияние оказывает структура металла шва и околошовной зоны. В зависимости от химического состава и скорости охлаждения структура металла шва может быть самой разнообразной.

Наплавленный металл, образующий валик, представляет собой литой металл, весьма быстро охлажденный и затвердевший. Быстрота охлаждения придает наплавленному металлу характерную дендритную структуру (крупнозернисто-столбчатую), также вследствие быстрого охлаждения, наплавленный металл часто бывает засорен неметаллическими включениями и газовыми пузырями.

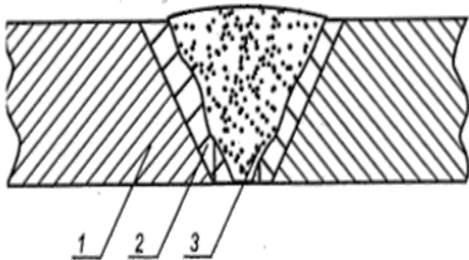
По химическому составу наплавленный металл представляет собой нечто среднее между основным и электродным металлом.

Вследствие перегрева металл в значительной мере теряет легкоиспаряющиеся и окисляющиеся составные части, например Mn, C, Si. Вредные примеси практически не выгорают. Посредством легирования через электродную проволоку, обмазку электродов и флюс удастся предупредить ухудшение химического состава металла в процессе сварки и восстановить его механические свойства.

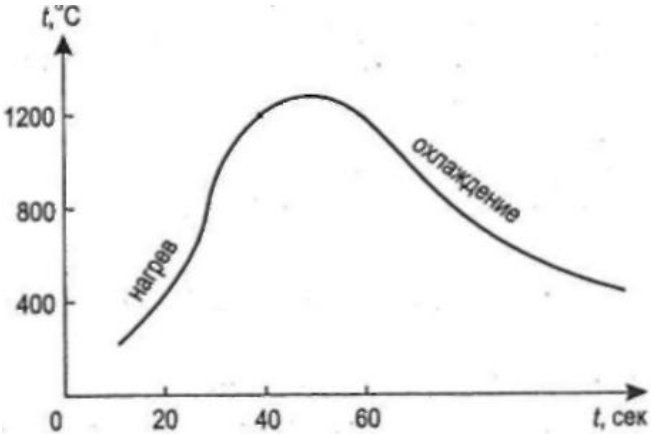
Структурное строение сварных швов



Изменения структуры, происходящие в зоне термического влияния при сварке низкоуглеродистой стали



Основные зоны сварного соединения:
1 – основной металл; 2 – зона термического влияния; 3 – наплавленный металл



Изменение температуры металла в зоне термического влияния

Структурное строение сварных швов



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

К наплавленному металлу прилегает **переходная зона**, лежащая между ним и неизменным основным металлом. Это и есть **ЗТВ**, ее образование при сварке неизбежно. Общие размеры ЗТВ зависят от вида сварки, толщины и теплофизической характеристики металла, температуры окружающей среды и составляют от нескольких миллиметров до нескольких десятков миллиметров.

В ЗТВ сначала происходит быстрое повышение температуры, а затем замедленное охлаждение металла (из-за отдачи тепла в холодный основной металл). Резкие изменения температуры в околошовной зоне приводят к структурным преобразованиям металла и к значительным пластическим деформациям. Имеющиеся в кромках основного металла дефекты типа расслоений, сульфидных включений в результате такого воздействия раскрываются, поэтому зона термического влияния должна подвергаться неразрушающему контролю до и после сварки.

Результат теплового воздействия на металл в зоне термического влияния подобен реакции данного металла на термическую обработку. Может наблюдаться как **закалка с образованием твердых и хрупких структур**, так и **отжиг со значительным снижением прочности и текучести**. Тогда и в аналогичных случаях наиболее слабым местом сварного соединения может быть уже не шов, а зона термического влияния, поэтому приходится принимать специальные меры для изменения теплового режима в процессе сварки и последующей термообработки.

В зоне термического влияния различают следующие участки:

Участок неполного расплавления является переходным от металла шва к основному металлу и представляет собой узкую полоску основного металла при температуре выше температуры его плавления. Этот участок, также называемый зоной сплавания, находится в твердожидком состоянии, что способствует диффузии некоторых элементов; поэтому **по химическому составу эта зона отличается как от шва, так и от основного металла**. В зависимости от характера источника нагрева и свойств металла ее ширина находится в пределах $(0,1 \div 0,4)$ мм. Эта зона имеет важнейшее значение, поскольку по ней наиболее часто проходят разрушения сварных конструкций. Здесь могут возникать трудно выявляемые закрытые трещины.

Структурное строение сварных швов



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Участок перегрева, подвергавшийся нагреву до температуры 1100-1400°C, имеет крупнозернистую структуру и при повышенной погонной энергии в стали с увеличенным содержанием углерода может стать причиной низкой пластичности и вязкости сварного соединения.

Участок (нормализации) перекристаллизации, подвергавшийся воздействию температур 850-1100°C. Эта температура благоприятно влияет на образование мелкого зерна, что обеспечивает высокие механические свойства участка.

Участок неполной перекристаллизации, подвергавшийся воздействию температур 720-850°C, характеризуется частичным появлением новых зёрен в основном металле.

Участок старения при рекристаллизации, подвергавшийся воздействию температур 450-700°C. Здесь происходит рост зёрен феррита из их раздробленных частей (рекристаллизация), полученных при пластической деформации металла, и процесс старения, заключающийся в выделении избыточного С и N в виде нитридов и карбидов вокруг решётки стали, что сопровождается повышением прочности и снижением пластичности. При сварке литых сплавов, не подвергавшихся пластической деформации, этот участок отсутствует.

Участок синеломкости, подвергавшийся нагреву до 100-450°C, не имеет заметных структурных изменений, однако при сварке низкоуглеродистой стали, содержащей повышенный процент газов (O₂, N₂, H₂), наблюдается на этом участке выделение их избытка в структурную решётку металла, что также повышает прочность, но снижает пластичность и вязкость металла.

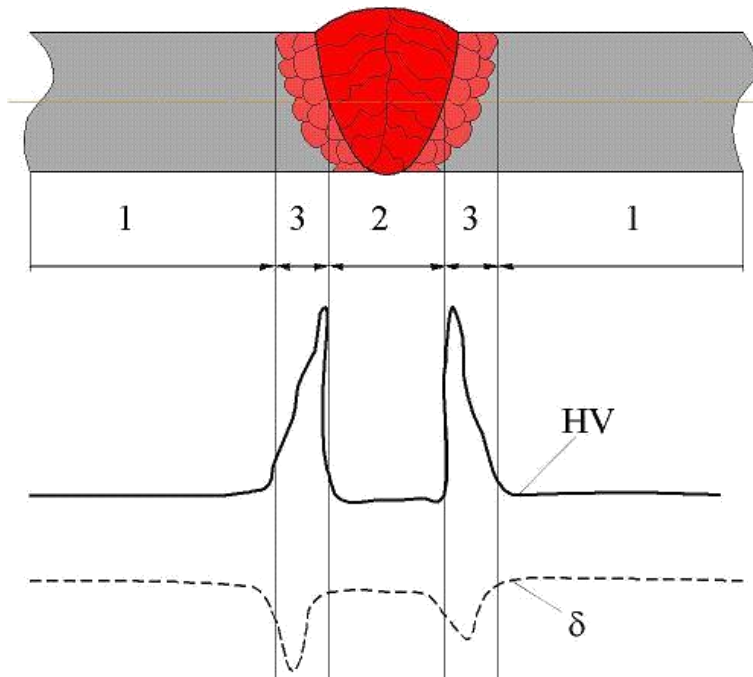
В зависимости от мощности источника тепла, степени его концентрированности и скорости движения, длительность нагрева и охлаждения зоны термического влияния изменяются от долей секунды до нескольких минут. Таким же образом меняется её ширина – от 1-3 мм при ручной дуговой и до 10-20 мм при электрошлаковой сварке.

Структурное строение сварных швов



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Неоднородность механических свойств
различных зон сварного соединения



Прочность и твердость шва, как правило, ниже, чем у основного материала. Это объясняется тем, что для предотвращения образования трещин при сварке плавлением применяют менее легированный присадочный материал, чем металл заготовок.

Пониженная пластичность шва может быть обусловлена крупнозеренной литой макроструктурой и повышенным содержанием газов.

В ЗТВ в результате фазовых превращений возможно существенное изменение твердости и пластичности

1 - основной металл; 2 - шов; 3 - зона термического влияния;
HV - твердость; δ - пластичность (относительное удлинение)

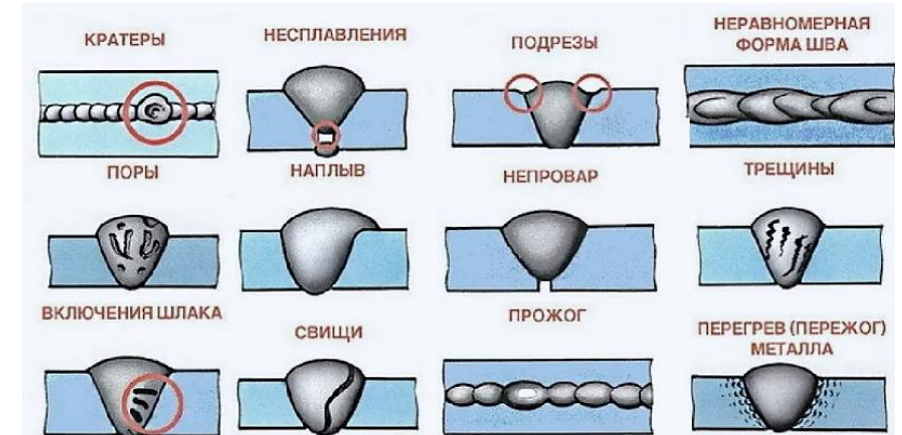
Основные дефекты сварных соединений



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

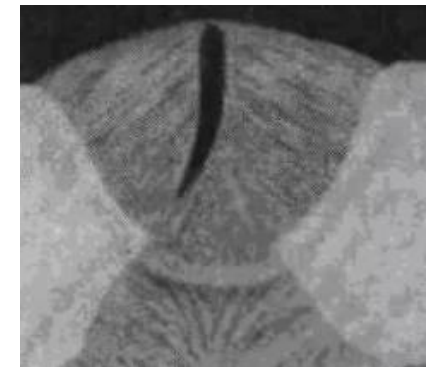
Наиболее часто встречающиеся типы дефектов сварных соединений можно условно разделить на четыре группы:

- по их расположению
- по форме
- по размерам
- по количеству



По расположению различают дефекты наружные, внутренние и сквозные. По форме – точечные и протяженные, плоские и объемные, острые и округлые. По размерам – мелкие, средние и крупные. По количеству – единичные и групповые (скопления).

К наружным дефектам относятся нарушения формы, размеров и внешнего вида швов: неравномерная ширина шва по длине, неравномерная высота шва, неравномерные катеты угловых швов, подрезы, наплывы, прожоги, незавершенные кратеры, свищи. Образование внутренних дефектов при сварке связано с металлургическими, термическими и гидродинамическими явлениями, происходящими при формировании сварного шва. К внутренним дефектам относятся трещины (горячие и холодные), непровары, поры, шлаковые включения, вольфрамовые и оксидные. Эти шесть основных видов дефектов следует различать в соответствии с ГОСТ 2601-84.



Основные дефекты сварных соединений



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

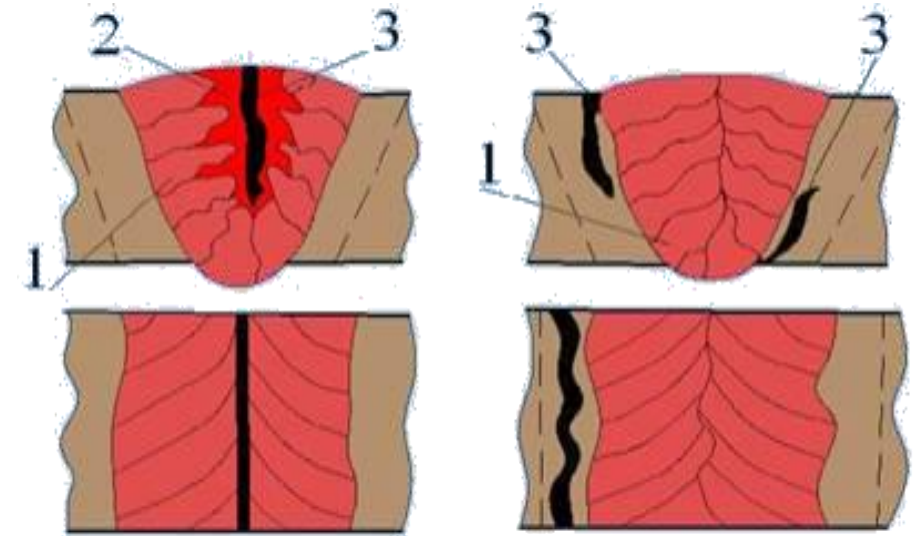
Дефекты являются концентраторами напряжений

Опасность технологических дефектов зависит от их «остроты» и протяженности. Если дефект имеет размеры, превышающие допустимые, то изделие бракуется, а дефектное место подвергают ремонту. При этом часть сварного соединения удаляется вместе с дефектом. Образовавшаяся полость заваривается вновь. Размеры дефектов, недопустимые для ремонта оговариваются НД. **Необходимо помнить, что ремонт приводит обычно к дополнительным повышенным остаточным напряжениям.** На отремонтированном участке дефекты меньших размеров могут быть значительно опаснее, чем более крупные дефекты в изделии перед ремонтом. Один и тот же тип дефекта в отремонтированном шве значительно опаснее, чем в первоначальном соединении.

Трещины – главная опасность при сварке. Они могут быть горячие или холодные.

Горячие трещины образуются главным образом в сварных швах различных сплавов в процессе их кристаллизации в некотором интервале температур. Они извилисты, в изломе имеют темный цвет, сильно окислены, распространяются по границам зерен.

Во время пребывания шва в температурном интервале кристаллизации он находится в твердожидком состоянии, т.е. состоит из твердых кристаллов, окруженных жидкими прослойками. В ряде случаев сварочные деформации и напряжения оказываются достаточными, чтобы вызвать разрушение по жидким межкристаллическим прослойкам, т.е. привести к образованию горячих трещин. Горячие трещины наблюдаются в высоколегированных сталях.



Вид трещин сварных соединений: а - горячих; б - холодных; 1 - столбчатые кристаллы; 2 - расположение жидких прослоек при завершении кристаллизации шва; 3 - трещины

Основные дефекты сварных соединений



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Холодные трещины чаще всего возникают в зоне термического влияния после полного затвердевания сварного шва в период завершения охлаждения или последующего вылеживания сварной конструкции (развиваются в течение нескольких часов или даже суток).

Холодные трещины возникают под действием остаточных сварочных напряжений, образуются в сталях перлитного и мартенситного классов, если в процессе сварки происходит частичная или полная закалка металлов в зоне термического влияния (быстрое охлаждение) и насыщении металла шва и зоны термического влияния водородом.

Для оценки склонности металла к появлению холодных трещин чаще всего используется углеродный эквивалент.

Холодные трещины в шве и переходной зоне, расположенные под любым углом ко шву, в изломе светлые или со слабыми цветами побежалости. **Возникают при остывании детали в зоне пониженных температур, преимущественно при дуговой сварке низколегированной стали большой толщины.** Чаще всего трещины возникают в переходной зоне вследствие неправильной техники сварки или неправильно выбранного присадочного материала.

Причины образования:

- неправильно выбранная марка присадочного материала
- неудовлетворительное качество присадочной проволоки, обмазки или флюса
- неправильные режимы и техника сварки
- высокие внутренние напряжения в швах
- наличие в швах пористости или шлаковых включений



Основные дефекты сварных соединений



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Мелкие трещины (микротрещины) в шве или надрывы по переходной зоне на нетравленых шлифах под микроскопом видны в виде тонких линий. Возникают вследствие неудовлетворительного качества присадочной проволоки, обмазки или флюса.

Трещины, образующиеся в сварных соединениях при термообработке (закалке) узлов, деталей; могут иметь любое направление. Возникают из-за несоблюдения режимов и условий термической обработки сварных узлов или вследствие неудовлетворительной (нетехнологичной) конструкции детали или узла.

Трещины рихтовочные могут иметь любое направление, в изломе светлые. Причина образования - неправильная технология правки изделий, получивших коробление.

Поры и раковины – пузыри (обычно сферической формы) различной величины, заполненные газами (водород, окись углерода). Образуются из-за присутствия газов, поглощаемых жидким металлом в процессе сварки.

Шлаковые включения в металле шва – небольшие объемы, заполненные неметаллическими веществами (шлаками, окислами). Их размер колеблется от микроскопического до нескольких миллиметров в поперечнике. Форма может быть самой различной – от сферической до плоской, вытянутой в виде пленки, которая разделяет прилегающие объемы наплавленного металла.

Подрезы – это дефекты сварного соединения, представляющие собой **местные уменьшения толщины основного металла в виде продольных канавок**. Подрезы относятся к наиболее часто встречающимся дефектам, чаще всего они образуются при сварке угловых швов в случае смещения электрода или при несколько завышенном напряжении дуги.



Одна из кромок проплавляется глубже, жидкий металл стекает на горизонтально расположенную деталь и его не хватает для заполнения канавки. Обычно при повышенном напряжении дуги и завышенной скорости сварки на стыковых соединениях образуются двусторонние подрезы. Такие же дефекты могут образовываться в случае увеличения угла разделки при механизированной и автоматической сварке. Односторонние подрезы всегда образуются при сварке горизонтальных швов на вертикальной плоскости. Подрезы выявляют внешним осмотром и если их глубина и протяженность превышают допустимые нормы, то эти дефекты зачищают и заваривают.

Основные дефекты сварных соединений



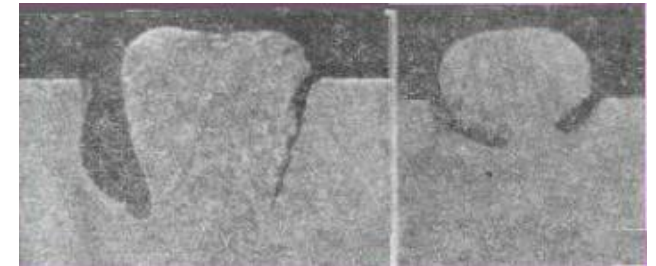
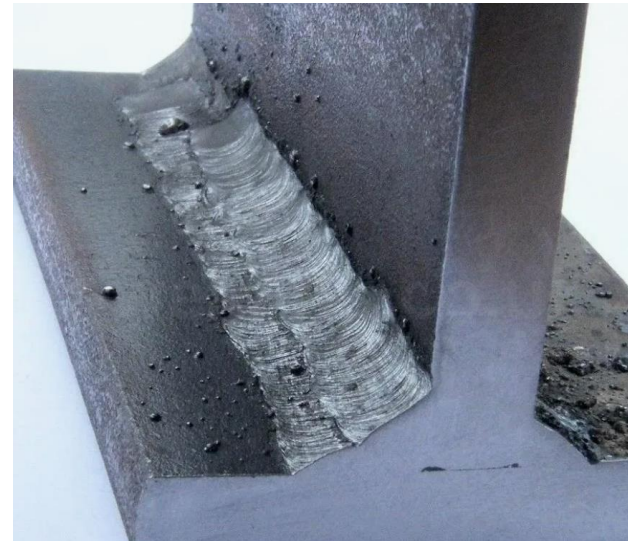
АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Непровар – отсутствие сплавления между основным и наплавленным металлом в корне шва или по кромке, а также между отдельными слоями-проходами при многопроходной сварке.

Основные причины:

- малый угол скоса вертикальных кромок
- малый зазор между кромками
- загрязнение кромок
- высокая скорость сварки

Дефектный участок шва удаляют и наложение сварного шва выполняют еще раз



Основные дефекты сварных соединений



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Наплывы – дефекты сварного соединения, получающиеся когда жидкий металл шва натекает (наплывает) на основной металл, но с ним не сплавляется. Наплывы не имеют большой ширины, но вдоль шва в некоторых случаях располагаются по всей длине.

Причины:

- заниженное напряжение дуги
- наличие на свариваемых кромках толстого слоя окалины
- излишнее количество присадочного металла, который в расплавленном состоянии не уменьшается в разделке кромок или в зазоре
- неправильным расположением электрода относительно оси шва при сварке кольцевых поворотных стыковых швов

Прожоги – дефекты, возникающие, когда жидкий металл сварочной ванны вытекает через сквозное отверстие в шве с образованием ярко выраженного углубления или отверстия. Первопричиной появления прожогов является завышенный сварочный ток или внезапная остановка сварочного автомата. Также может возникнуть вследствие неоправданно увеличенного зазора между кромками, недостаточной толщины подкладки или неплотного прилегания ее к основному металлу вдоль кромок. Дефектные места должны быть зачищены и заварены.

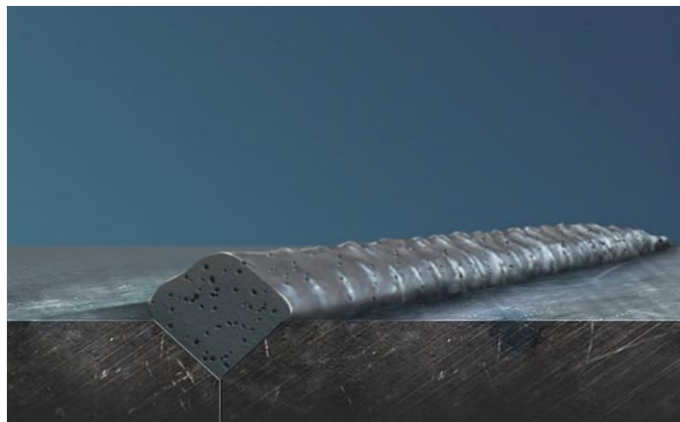
Кратеры – образуются местах неправильного обрыва дуги образуется углубление, в котором могут быть усадочные рыхлотости, приводящие к образованию трещин. Поэтому эти дефекты чаще всего вырубает, зачищает и заваривают. При механизированных и автоматизированных процессах сварки применяют выводные планки, на которых начинают или заканчивают швы. После сварки эти выводные планки вместе с кратерами удаляются. При правильной настройке автомата кратеры завариваются автоматически за счет плавного снижения сварочного тока.

Свищи – дефекты, которые образуются из канальных пор в виде полостей, выходящих на поверхность.

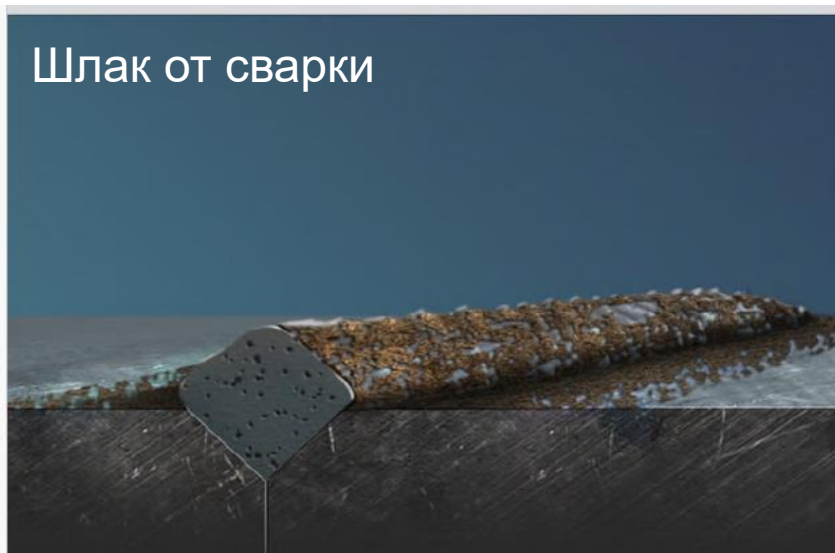
Основные дефекты сварных соединений



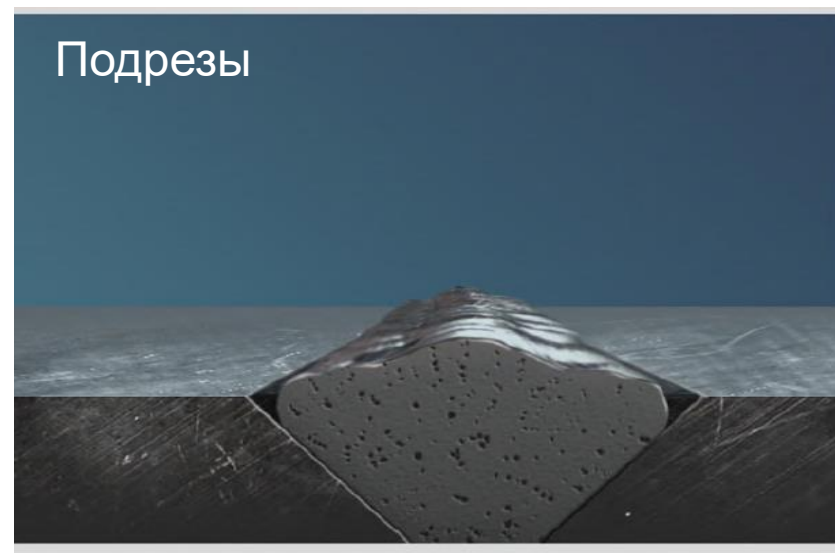
АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ



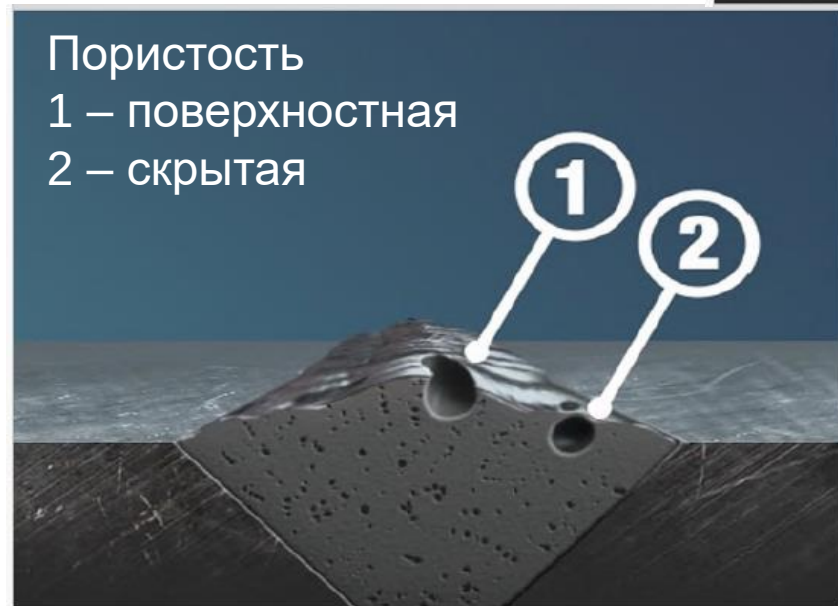
Шлак от сварки



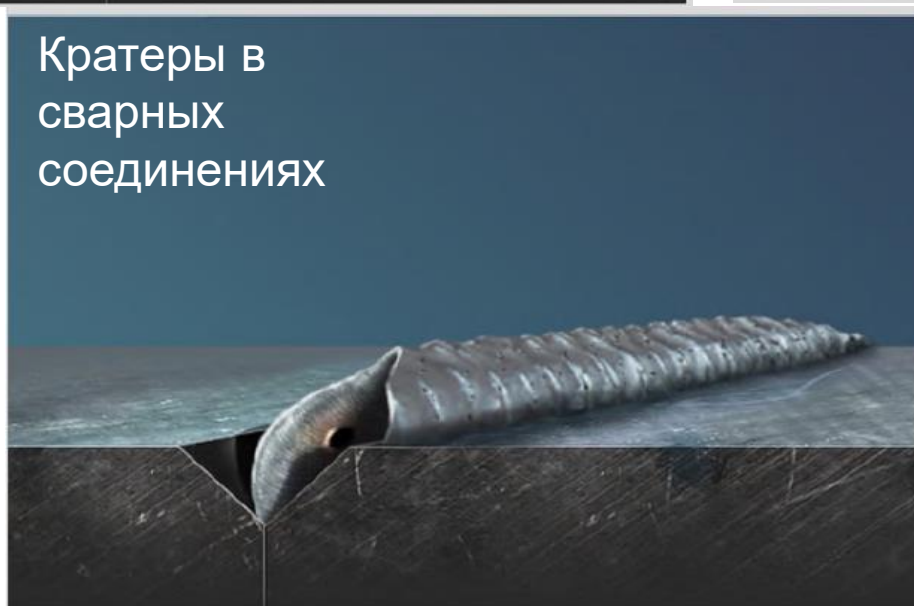
Подрезы



Пористость
1 – поверхностная
2 – скрытая



Кратеры в
сварных
соединениях





Наплавка – нанесение расплавленного металла на поверхность изделия, нагретую до оплавления или до температуры надежного смачивания жидким наплавленным металлом.

Наплавку применяют для создания на деталях поверхностных слоев с требуемыми свойствами (износостойкость, коррозионная стойкость), а также для восстановления исходных размеров изношенных деталей. Например, наплавку используют для изготовления деталей из конструкционных, сравнительно дешевых сталей, на рабочие поверхности которых наплавливают износостойкий, жаростойкий или иной специальный сплав. Наплавка металла на поверхность детали дает возможность придать ей необходимые достаточные механические и физико-химические свойства и тем самым повысить надежность и долговечность работы и снизить себестоимость.

При наплавочных работах, как правило, необходимо **получать минимальное проплавление основного металла и минимальное перемешивание основного и наплавленного металла для того, чтобы сохранить механические свойства наплавленного слоя**. В то же время наплавленный металл должен прочно соединяться с металлом основы и не должен содержать пор, шлаковых включений, раковин трещин и др. дефектов.

Также необходимо обеспечение минимальной зоны термического влияния и минимальных напряжений и деформации. Это требование обеспечивается за счет уменьшения глубины проплавления регулированием параметров режима, погонной энергии, увеличением вылета электрода, применением широкой электродной ленты и другими технологическими приемами.

Наплавка может производиться на плоские, цилиндрические, конические, сферические и другие формы поверхности в один или несколько слоев. Толщина слоя наплавки может изменяться в широких пределах - от долей миллиметра до сантиметров.



Наплавлять можно металл одинаковый по составу, структуре и свойствам с основным металлом, или значительно отличающийся от него. В последнем случае на основной металл предварительно наплавляют промежуточные слои.

Выбор технологических условий наплавки производят, исходя из особенностей материала наплавляемой детали. Наплавку деталей из низкоуглеродистых и низколегированных сталей обычно производят в условиях без нагрева изделий. Наплавка средне- и высокоуглеродистых, легированных и высоколегированных сталей часто выполняется с предварительным нагревом, а также с проведением последующей термообработки с целью снятия внутренних напряжений. Нередко такую термообработку (отжиг) выполняют после наплавки для снижения твердости перед последующей механической обработкой слоя.

В процессе наплавки в изделии появляются значительные внутренние напряжения, которые приводят к его короблению, а иногда и к разрушению.

Меры для предотвращения возникновения напряжений или снятия их с целью уменьшения деформации изделия:

- предварительный подогрев до $(200 \div 400) ^\circ\text{C}$
- ведение наплавки с погружением изделия в воду без смачивания наплавляемой поверхности
- ведение процесса при жестком закреплении изделия в приспособлении
- предварительный изгиб изделия в направлении, обратном ожидаемому изгибу
- высокотемпературный отпуск после наплавки с нагревом до $(650 \div 680) ^\circ\text{C}$

Для выполнения наплавки в основном применяют способы дуговой и электрошлаковой сварки. При выборе наиболее рационального способа и технологии наплавки следует учитывать условия эксплуатации наплавленного слоя и экономическую эффективность процесса.



Корпуса первых энергетических реакторов в ряде стран защищались от коррозии со стороны рабочей среды (воды) тонкостенной облицовкой из аустенитной стали, присоединенной к корпусу точечной сваркой. Указанная конструкция оказалась, неудачной из-за появления трещин в местах приварки. В настоящее время повсеместно в мировой практике для защиты корпуса реактора от общей и язвенной коррозии используют антикоррозионную наплавку сварочной проволокой или лентой. В зарубежном реакторостроении нашли известны случаи использования для наплавки сплавов с повышенным содержанием Ni типа «инколой», «иконель».

Одним из характерных дефектов, связанных с антикоррозионной наплавкой, является возможность образования трещин в основном металле под аустенитной наплавкой в зоне теплового воздействия. Трещины образуются по границам крупных зерен в зоне перегрева металла на глубине (2,5 ÷ 5,0) мм. Процесс наплавки ведет к образованию крупнозернистой структуры. При последующей термообработке корпуса реактора деформационная способность крупнозернистого металла оказывается недостаточной для компенсации пластической деформации, возникающей вследствие разницы коэффициентов линейного расширения наплавки, стали. Образованию трещин под наплавкой способствует увеличение содержания углерода, хрома до 2,0 %, ванадия и примесных легкоплавких элементов в реакторной стали.

Считается, что образование трещин под аустенитной наплавкой может быть устранено с помощью применения двухслойной наплавки, процессов наплавки с малой погонной энергией, плакирующего материала с термическим коэффициентом расширения, близким таковому для плакируемого материала, оптимизации состава основного металла по C, Cr, V, Mn и др.

Для всех движущихся деталей, соприкасающихся с активной средой, необходимо применение специальных мер для обеспечения работоспособности трущихся пар, особенно в арматуре с большими номинальными диаметрами. В этом случае проблема работоспособности деталей в условиях трения обычно решается посредством нанесения на поверхность кобальтового сплава (стеллита) с повышенной твердостью хотя бы на одну из поверхностей скольжения. Коррозионно-эрозионные повреждения этих участков должны быть минимальны во избежание загрязнения контура сильно активирующимся кобальтом.



Трещины. Наиболее распространенный дефект всех разновидностей наплавки. Трещины могут возникнуть как в наплавленном слое металла, так и в основном металле.

При наплавке на основной металл с неудовлетворительной свариваемостью или при высокой твердости наплавленного металла зачастую образуются сварочные трещины, что может быть связано с чрезмерно большими термическими напряжениями, возникающими, в частности, при сплошной наплавке по большой поверхности.

Вероятность возникновения трещин при наплавке так же, как и при сварке, определяется химическим составом основного и присадочного материала, жесткостью наплавляемой конструкции, режимом наплавки и тесно связана с формированием первичной структуры и скоростью охлаждения. Кроме того, следует иметь в виду, что различные коэффициенты термического расширения основного металла и наплавленного слоя существенно повышают вероятность их появления.

Для предотвращения образования трещин обычно применяют следующие меры:

- предварительный и сопутствующий подогрев во время наплавки для поддержания заданной температуры нагрева основного металла
- нагрев изделий непосредственно после наплавки и замедленное охлаждение наплавленного металла
- последующую термообработку для снятия напряжений
- наплавку пластичного подслоя на поверхность основного металла, обладающего неудовлетворительной свариваемостью
- уменьшение числа слоев при многослойной износостойкой наплавке
- выбор для износостойкой наплавки способов, вызывающих меньшие термические напряжения в изделиях; при наплавке участков поверхности с потенциальной концентрацией напряжений следует применять, например, наплавку в два приема
- правильный выбор наплавочного материала для первого слоя коррозионностойкой наплавки с учетом характера влияния основного металла на состав наплавленного слоя
- выполнение наплавки только после удаления с поверхности основного металла поверхностного слоя, содержащего дефекты или имеющего повышенную твердость



Поры и раковины

Поры образуются при использовании влажного или отсыревшего флюса, при наличии ржавчины на наплавляемых поверхностях, при недостаточном слое флюса и др.

Поры менее опасный дефект, чем трещины, но они снижают износостойкость и прочность наплавленного металла.

Для предотвращения образования пор и раковин необходимо:

- зачищать поверхности основного металла от ржавчины, масла и других загрязнений
- обеспечивать хранение флюса и наплавочных материалов в условиях, исключающих поглощение влаги, и их прокалку перед использованием для наплавки
- воздерживаться от подачи наплавочного материала к очагу наплавки до момента запотевания поверхности основного металла при газовой наплавке и от резкого удаления пламени при окончании наплавки, применять горючие смеси, обеспечивающие получение науглероживающего пламени
- воздерживаться от применения при дуговой наплавке большой силы тока и излишних поперечных колебаний электрода, поддерживать оптимальную длину дуги
- предотвращать проведение наплавки в условиях неудовлетворительной защиты зоны дуги (обеспечение необходимой защиты сварочной ванны флюсом-шлаком или защитным газом)



Шлаковые включения чаще наблюдаются при многослойной наплавке. Они являются результатом наплавки по не удаленной или плохо удаленной шлаковой корке с предыдущих слоев. Шлак не успевает расплавиться и всплыть на поверхность металла, вследствие чего остается в металле в виде шлаковых включений.

Несплавления наплавленного металла с основным металлом детали могут образоваться при несоответствии, например, выбранной скорости наплавки и типа оборудования, неправильной установке электрода, загрязнении наплавляемых поверхностей, нарушении режима наплавки и др. Наличие этих дефектов может привести к отколу наплавленного слоя в процессе работы восстановленной детали.

Причина **наплывов и подрезов** в наплавленном слое — нарушение режима наплавки (силы тока, напряжения дуги, скорости наплавки, смещение электрода с зенита при наплавке цилиндрических деталей, изменение размера вылета электрода и др.).

Причиной поверхностных дефектов наплавленного слоя может быть и плохая устойчивость дуги.

Подрезы

Для предотвращения подрезов, особенно характерных для наплавки ленточными электродами, необходимо:

- исключать наклон наплавляемой поверхности более чем на 3° к горизонту
- воздерживаться от чрезмерного повышения скорости наплавки
- обеспечивать надлежащее положение дуги, исключая магнитное дутье
- выбирать оптимальный способ наложения валиков с необходимым их перекрытием

Кроме перечисленных, возможно возникновение других дефектов, в том числе застревание шлака в наплавленном металле, неудовлетворительное сплавление наплавленного слоя с подложкой, деформация изделия и др.

Связанные с застреванием шлака и плохим сплавлением дефекты возникают при недостаточной силе тока и низком напряжении при дуговой наплавке или при неправильном манипулировании – подаче присадочного материала. Для предотвращения таких дефектов необходим правильный выбор способа и режима наплавки.

Дефекты наплавки



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Одна из серьезнейших проблем наплавки – деформация изделий

Для предотвращения применяют:

- равномерный предварительный подогрев изделия
- различные приемы наплавки, исключаящие неравномерную деформацию изделия
- сварочные приспособления, зажимные устройства и др.

Предварительная оценка возможной деформации составляет важнейшую предпосылку правильного выбора мер предотвращения ее при наплавке.

Контроль качества сварных соединений и наплавленных поверхностей



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Регламентирующие документы (могут быть уточнены и дополнены в рамках конкретного проекта): НП-104, НП-105, ПНАЭ Г-7-009; ПНАЭ Г-7-010. Для удобства оценки сварных швов введен ряд понятий.

Однотипное сварное соединение. Однотипными считаются производственные сварные соединения, имеющие одинаковые конструктивно-технологические признаки: одинаковую конструкцию, аналогичную форму раздела кромок, выполненные по единому технологическому процессу (одним способом сварки, в одних и тех же положениях, сварочными материалами одной марки и одного диаметра, при одних и тех же режимах сварки, подогрева и термообработки и т. п.) на элементах из стали одной марки, при соотношении максимальных и минимальных толщин и наружных диаметров не более 1,65. [Понятие однотипных сварных соединений позволяет минимизировать объем работ при производственных аттестациях технологий сварки \(наплавки\).](#)

Контрольное сварное соединение. Контрольным считается сварное соединение, идентичное контролируемым производственным соединениям: должны быть одинаковые марки стали соединяемых элементов, их толщина и диаметр, тип и конструкция соединения, форма разделки кромок. [Технологический процесс выполнения контрольного сварного соединения должен соответствовать технологическому процессу, применяемому при изготовлении контролируемого оборудования или при соединении его с трубопроводом.](#) Должны применяться тот же способ сварки, в том же положении, те же сварочные материалы, той же марки и того же диаметра, при тех же режимах, с тем же подогревом, с той же термообработкой и т. п. Контрольные сварные соединения должны выполняться в тот же период времени, что и контролируемые ими производственные сварные соединения, тем же сварщиком, на том же оборудовании и по той же технологии, под наблюдением специально выделенных ответственных лиц — представителя ОТК, мастера или других специалистов.

Контрольные сварные соединения выполняются на специальных припусках или на приварных контрольных [пластинах совместно со сваркой основного изделия либо отдельно от изделия, если совместное их изготовление невыполнимо.](#)

Качество сварного шва оценивается по результатам наиболее ответственной из предъявляемых контрольной пробой соединений. При обнаружении неисправимых дефектов все производственные сварные соединения должны быть проверены в полном объеме тем же методом дефектоскопии, которым выявлены дефекты, за исключением случаев, когда производственные сварные соединения подвергаются 100-процентному контролю. Контрольное сварное соединение с дефектом бракуется и должно быть снова выполнено тем же сварщиком для повторного контроля.

Контроль качества сварных соединений и наплавленных поверхностей



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Для контроля качества сварных соединений и наплавленных поверхностей применяются следующие методы *неразрушающего* контроля:

- визуальный контроль для определения качества формирования наплавленного металла, наличия трещин, отколов, свищей и других дефектов, выходящих на поверхность наплавленного металла
- люминесцентный или цветной контроль с целью выявления дефектов, выходящих на поверхность наплавленного металла, но не выявляемых визуально
- магнитный контроль для выявления дефектов на поверхности и на небольшой глубине под поверхностью наплавленного металла
- ультразвуковой контроль, гамма- и рентгенодефектоскопия для выявления дефектов в наплавленном слое и на границе сплавления

Как правило, *разрушающим* методам контроля подвергают образцы-свидетели, которые наплавливают и одновременно подвергают термообработке со штатными изделиями. К этой группе методов контроля можно отнести:

- контроль химического состава наплавленного металла
- механические испытания и контроль твердости наплавленного металла (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение и сужение, ударная вязкость, прочность сцепления основного и наплавленного металла на срез и отрыв)
- коррозионные испытания

Могут быть использованы и другие методы, если они предусмотрены действующими Правилами контроля сварных соединений, техническими условиями на изготовление оборудования или требованиями рабочих чертежей. Результаты контроля сварных соединений фиксируются в соответствующих документах.

Для оборудования АЭС: объем контроля в соответствии с НП-105 (ПНАЭ Г 7-010); требования к сварочным материалам – НП 104 (ПНАЭ Г 7-009)

Контроль качества сварных соединений и наплавленных поверхностей



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Все сварные соединения должны иметь клеймение или иное условное обозначение, позволяющее установить фамилию сварщика, выполнившего это соединение. Система клеймения устанавливается соответствующей инструкцией.

Внешнему осмотру и измерению размеров шва подлежат основной металл и все швы по всей длине. При проверке выявляются поверхностные дефекты и отклонения от заданных размеров. Осмотр и измерение сварных соединений должны проводиться с обеих сторон шва, если они доступны для контроля. В целях обеспечения качественного контроля поверхность сварного шва или наплавки, а также прилегающие к нему в обе стороны от шва участки основного металла шириной не менее 20 мм до осмотра должны быть очищены от шлака, брызг расплавленного металла и других загрязнений и зачищены.

Механические испытания прочности сварных соединений производятся в соответствии с требованиями ГОСТ 6996-66. Основные виды механических испытаний на растяжение, на статический изгиб или сплющивание и на ударную вязкость выполняются с использованием образцов, изготавливаемых из контрольных (или производственных) сварных соединений.

Из каждого контрольного стыкового сварного соединения должны быть вырезаны:

- два образца для испытания на растяжение
- два образца для испытания на статический изгиб
- три образца для испытания на ударную вязкость
- два образца (шлифа) для металлографического исследования

Контроль качества сварных соединений и наплавленных поверхностей



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Механические свойства антикоррозионной наплавки определяются по результатам испытаний наплавочных материалов, проводимых согласно требованиям технических условий на приемку аустенитных сварочных материалов, предназначенных для выполнения антикоррозионного покрытия

Механические испытания сварных соединений труб диаметром менее 100 мм при толщине стенки менее 12 мм могут проводиться с использованием как отдельных образцов, так и цельных стыков со снятым усилением и удаленным гратом. Испытания последних на статический изгиб заменяются испытанием на сплющивание. Достаточно испытания по одному контрольному стыку на сплющивание и растяжение. Металлографическое исследование в этом случае выполняется на специально свариваемых контрольных соединениях

При испытаниях на статическое растяжение определяются следующие механические характеристики: условный предел текучести, предел прочности; относительное удлинение после разрыва. Испытывается наиболее слабый участок шва при нормальных и повышенных температурах

При испытаниях на ударный изгиб определяется ударная вязкость различных участков сварного соединения и наплавленного металла шва и околошовной зоны

Контроль качества сварных соединений и наплавленных поверхностей



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Твердость наплавки проверяется после окончательной термообработки. Контроль деталей с недоступными для замера твердости поверхностями выполняется на контрольных пробах. Детали с открытыми наплавленными поверхностями контролируются непосредственно, при этом твердость определяется на высоте рабочей поверхности наплавки по чертежу с припуском на окончательную механическую обработку не более 0,5 мм.

Гидравлическое испытание целостности швов и прочности соединения оборудования к трубопроводу проводится в собранном виде. Помимо этого, гидравлическому (или пневматическому) испытанию подвергается арматура после установки ее на трубопроводе при испытании всей системы или контура. При гидравлическом испытании в полости детали или конструкции создается пробное давление, под действием которого вода просачивается через рыхлости, трещины, непровар и т. п. Наружным осмотром определяют место течи, потение и другие проявления возможных дефектов сварки.

Сварные соединения или наплавка арматуры из сталей аустенитного класса испытываются на стойкость против межкристаллитной коррозии. Необходимость и метод испытаний устанавливаются техническими условиями на изготовление арматуры и указаниями рабочих чертежей. Испытания и оценка качества проводятся в соответствии с требованиями ГОСТ6032. Испытания выполняются по методу АМ с дополнительным провоцирующим нагревом (в случае термообработки шва или наплавки) или без него. Если проводились опытные наплавки применяемых аустенитных материалов и пробы подвергались термообработкам не меньше, чем штатное изделие в процессе изготовления с учетом дополнительной термообработки в случае ремонта сварных швов, то сертификационные данные испытаний, выполненных в соответствии с техническими условиями на приемку аустенитных сварочных материалов, считаются достаточными и дополнительные испытания не требуются. Качество сварного шва и наплавки считается удовлетворительным, если при изгибе или сплющивании после кипячения в химическом реактиве на поверхности образцов отсутствуют трещины или надрывы межкристаллитного характера.

Контроль содержания ферритной фазы (СФФ)



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Контроль содержания ферритной фазы производится для заготовок свариваемых деталей. СФФ ограничивается как в сварочных материалах, так и в материале свариваемых деталях из аустенитных и двухфазных феррито-аустенитных хромоникелевых коррозионностойких сталей.

Для заготовок деталей, не подлежащих сварке, необходимость проведения контроля указывается в КД. Для деталей, подлежащих наплавке твердыми износостойкими материалами, контроль содержания ферритной фазы не проводится.

Количество ферритной составляющей ограничивается во избежание как горячих трещин при сварке, так и охрупчивания от теплового старения.

Также, присутствие ферритной фазы может ухудшать служебные свойства сталей в области криогенных температур, но благотворно влиять на них в условиях коррозии под напряжением.

При содержании СФФ более $(4 \div 5) \%$ при длительной выдержке при сравнительно низких температурах $(300 \div 350) ^\circ\text{C}$ имеет место явление охрупчивания основного металла и сварных швов хромоникелевых сталей из-за возникновения в ферритной фазе чрезвычайно мелкой охрупчивающей σ -фазы.

Определение содержания ферритной фазы в наплавленном металле должно выполняться в соответствии с требованиями ГОСТ Р 53686-2009.

Контроль содержания ферритной фазы (СФФ)



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Содержание ферритной фазы в наплавленном металле (металле шва) должно быть:

- в пределах от 2 до 8 % для сварных соединений деталей, работающих при температуре **до 350 °С** включительно
- от 2 до 5 % – для сварных соединений деталей, работающих при температуре **свыше 350 °С**

и в любом случае не должно превышать значений верхнего предела, установленного в документах по стандартизации на соответствующие сварочные (наплавочные) материалы.

Эффективным средством предотвращения образования горячих трещин в сварных швах является использование сварочных материалов, обеспечивающих аустенитно-ферритную структуру металлу шва с содержанием ферритной фазы не менее 2 %.

Спасибо за внимание

Семенова Елена

Semanova_es@aep.ru

07.11.2024