

Лекция 11



ТЕХНОЛОГІЯ І ОБОРУДОВАННЯ СВАРКИ ПЛАВЛЕННЯМ

(по матеріалам учебника Акулова А.И., Бельчука Г.А., Демянцевич В.П.
Технология и оборудование сварки плавлением. Учебник для студентов вузов.
М., «Машиностроение», 1977. – 432 с.)

Автор: д. т. н. Лузан С.О.

**Лекция 11. Сварка углеродистых, низколегированных и среднелегированных закаливающихся сталей.
(тема 5)**

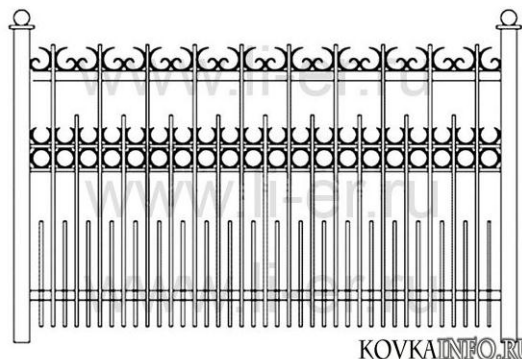
План лекции

- 1. Состав конструкционных и среднелегированных сталей, их свойства и области применения**
- 2. Основные сведения о свариваемости**
- 3. Особенности техники и технологии сварки углеродистых, низко и среднелегированных закаливающихся сталей**
 - 3.1 Ручная дуговая сварка**
 - 3.2 Автоматическая сварка под флюсом**
 - 3.3 Сварка в защитных газах**
 - 3.4 Электрошлаковая сварка**

1. Состав конструкционных и среднелегированных сталей, их свойства и области применения

К среднеуглеродистым конструкционным относятся, стали, содержащие 0,26-0,45% углерода.

Среднеуглеродистые стали, отличаются от низкоуглеродистых различным содержанием углерода.



С повышением углерода увеличивается прочность (σ_B и σ_T) и снижается пластичность (δ , ψ). Чувствительность к перегреву и закаливаемости повышается, что снижает свариваемость.

Среднеуглеродистые стали, используют в нормализованном состоянии. Для сварно-литых и сварно-кованых конструкций применяют преимущественно, стали 35 и 40. Качественные углеродистые стали, могут быть с повышенным содержанием марганца (0,7-10 %) - Ст5Гсп, Ст5Гпс, стали 25Г, 30Г, 35Г.



1. Состав конструкционных и среднелегированных сталей, их свойства и области применения

К конструкционным среднелегированным сталям относятся, стали, легированные одним или несколькими элементами при суммарном их содержании 2,5 - 10 %. Предназначены для работы при температурах до 500 °С.



Штанги буровые с замками 3-50, 3-56, 1,5м (замок: среднелегированная сталь. Толщина стенки трубы 3,5мм.)

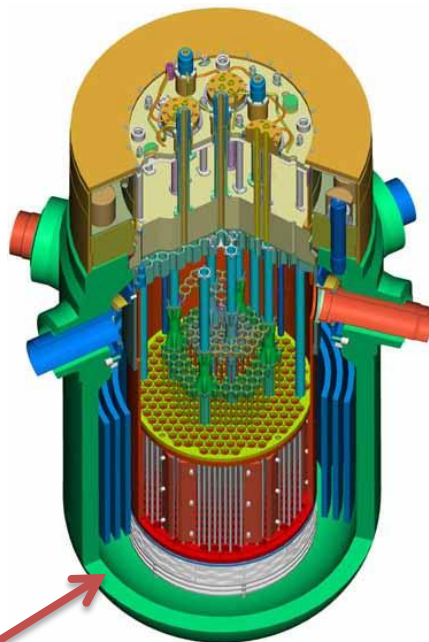
Для современных легированных сталей характерно многокомпонентное комплексное легирование. Оно более экономично и позволяет, получить стали с более высокими механическими свойствами. Временное сопротивление разрыву после упрочняющей ТО составляет 600-2000 МПа.

Широко применяются среднелегированные стали в конструкциях цилиндрических и шаровых ёмкостей высокого давления и ёмкостей ответственного назначения. Применяемые для сварных конструкций стали в основном относятся к перлитному классу (12Х2НВФА, 25ХГСА, 30ХГСА, 23Х2НВФА, 30ХГСНА).



1. Состав конструкционных и среднелегированных сталей, их свойства и области применения

Теплоустойчивыми называют, стали, предназначенные для длительной работы при температуре до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Эти стали, используют при изготовлении энергетических и нефтехимических установок.



Корпус реактора (ковано-сварной) выполнен из теплоустойчивой высокопрочной стали перлитного класса.

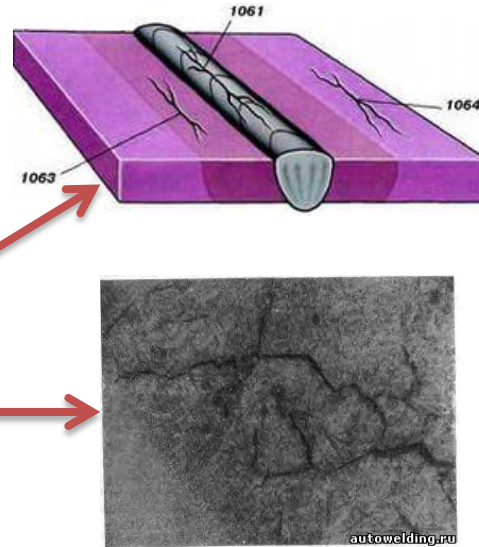
В соответствии с условиями длительной работы под напряжением, при высоких температурах теплоустойчивые стали должны обладать сопротивлением ползучести, длительной прочностью, стабильностью свойств во времени и жаростойкостью.

Перечисленные свойства достигаются применением хромомолибденовых и хромомолибденованадиевых сталей перлитного класса. Хромомолибденовые стали 12МХ, 15ХМ, 20ХМЛ, 15Х5М с ферритно-перлитной структурой используют для работы при температуре $500 \dots 550\text{ }^{\circ}\text{C}$. Хромомолибденованадиевые стали 12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 20ХМФЛ, 15Х1М1ФЛИ, 12Х2МФСР – для работы при температуре $550 \dots 580\text{ }^{\circ}\text{C}$.



2. Основные сведения о свариваемости

Среднеуглеродистые и среднелегированные конструкционные стали склонны к закалке и чувствительны к образованию **холодных трещин** в результате воздействия термического цикла сварки.



О свариваемости этой группы сталей судят по **полному эквиваленту углерода C_{Σ}** , который учитывает влияние на свариваемость сталей **химического состава и толщины свариваемых деталей:**

$$C_{\Sigma} = C_x \cdot (1 + 0,005 \cdot S)$$

C_x - химический эквивалент углерода;

$0,005$ - коэффициент толщины, определённые опытным путём;

S - толщина свариваемых деталей, мм.



2. Основные сведения о свариваемости

Химический эквивалент углерода C_x определяется по формуле:

Стали с эквивалентом по углероду более 0,45 % склонны к образованию трещин при сварке. В этом случае температура подогрева $T_{\text{под}}$ свариваемых деталей определяется по формуле:

$$T_{\text{под}} = 350 \cdot \sqrt{C_{\text{Э}} - 0,25}$$
$$C_x = C + 1,9 \cdot (Mn + Cr) +$$
$$+ 1/18 \cdot Ni + 1/13 \cdot Mo$$



2. Основные сведения о свариваемости

Восприимчивость среднеуглеродистых и среднелегированных конструкционных сталей к закалке, а также высокий уровень механических свойств обуславливают ряд специфических трудностей, возникающих при их сварке:



1. Предупреждение возникновения холодных трещин в околошовной зоне и металле шва



2. Предупреждение возникновения кристаллизационных трещин в металле шва



3. Необходимость получения металла шва, околошовной зоны и сварного соединения в целом с механическими свойствами, равноценными или близкими к свойствам основного металла.



2. Основные сведения о свариваемости

Для предупреждения возникновения **холодных трещин** в сварных соединениях конструкционных **закаливающихся сталей**, технолог сварщик располагает рядом методов:

1. Выбор сталей для сварных конструкций, обладающих требуемыми механическими свойствами при возможно более низком содержании углерода и легирующих элементов, повышающих восприимчивость стали к закалке;
2. Регулирование термического цикла сварки, что сопряжено с применением малопроизводительных режимов сварки, предварительного и сопутствующего подогревов, термообработки сварных соединений сразу же после окончания сварки;
3. Регулирование при охлаждении сварочных напряжений, состоящее в выборе химического состава металла шва, от которого зависит характер и объёмный эффект структурных превращений, и в установлении рациональной последовательности выполнения сварочных швов;



2. Основные сведения о свариваемости

Для предупреждения возникновения **холодных трещин** в сварных соединениях конструкционных закаливающих сталей, технолог сварщик располагает рядом методов:

4. Уменьшение содержания водорода в основном металле и металле шва.

5. Предварительная наплавка на кромки слоя аустенитного или ферритного металла, что позволяет предупредить образование околошовных трещин типа отколов вследствие благоприятного напряжённого состояния на границе раздела металл шва – основной металл;

6. Проковка сварных соединений с помощью пневматических устройств.



2. Основные сведения о свариваемости

Для повышения стойкости сварного металла шва против кристаллизационных трещин при всех видах сварки плавлением стремятся:

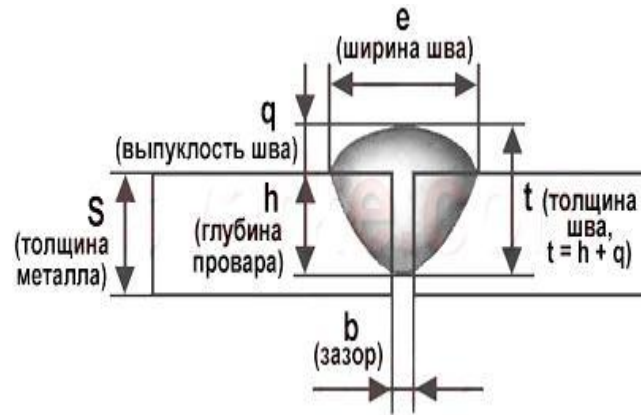
1. Снизить содержание в шве серы, углерода и других элементов, уменьшающих стойкость металла шва против образования кристаллизационных трещин;

2. Повысить содержание таких элементов, как марганец, хром и др., увеличивающих стойкость металла шва против образования кристаллизационных трещин.



2. Основные сведения о свариваемости

Это обычно достигается за счет применения электродных стержней и электродной сварочной проволоки с пониженным содержанием углерода и уменьшения доли основного металла в металле шва.



Коэффициент формы шва K_n

– отношение ширины шва e к его толщине t .

$$K_n = e / t$$

Стремятся также обеспечить получение швов с большим значением **коэффициента формы** и применяют предварительный и сопутствующий подогрев

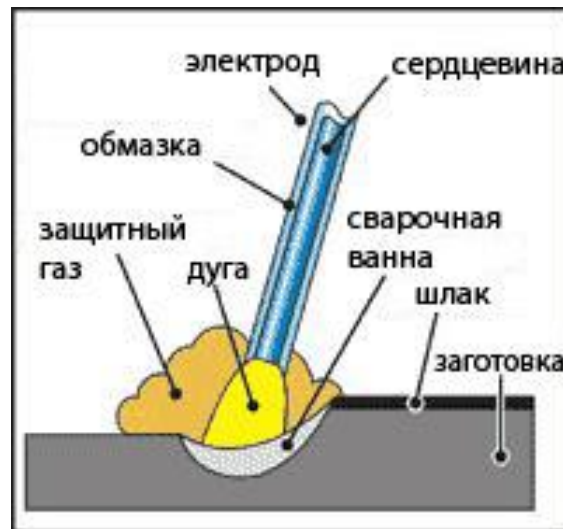
Равнопрочность сварных соединений достигается подбором сварочных материалов, дополнительным легированием металла шва элементами (Mn, Cr, Ti), повышающими прочность и стойкость металла против кристаллизационных трещин и последующей термической обработкой.



3. Особенности техники и технологии сварки углеродистых, низко и среднелегированных закаливающихся сталей

3.1 Ручная дуговая сварка

Для сварки сталей 40, 45, а также легированных средней прочности ($\sigma_B = 900 \dots 1300$ МПа) рекомендуются электроды УОНИ - 13/55, УОНИ - 13/65, УОНИ - 13/85. Они обеспечивают высокую пластичность и ударную вязкость металла шва, и стойкость против трещин.



Для сварки сталей средней и высокой прочности при толщинах более 2 мм наряду с электродами типа УОНИ – 13 рекомендуются электроды ВИ1 - 6 (Св - 18ХМА) и НИАТ - 3Н (Св - 08А).

Для получения швов с высокими пластическими свойствами и малой чувствительностью к концентраторам напряжений рекомендуется применять электроды со сварочной проволокой, обеспечивающей аустенитную структуру шва.



3.1 Ручная дуговая сварка

Электроды для дуговой сварки конструкционных сталей и механические свойства сварных соединений

Марка стали	Термическая обработка	Электрод		Механические свойства, не менее	
		Тип	ГОСТ	σ_b , кгс/мм ²	α_{Hr} , (кгс · м)/см ²
45	Без термообработки или закалка и отпуск после сварки	Э55	9467 – 75	0,9 σ_b основного металла	12
10Г2А 12Г2А	Без термообработки или с последующей нормализацией	Э60 Э70		0,9 σ_b основного металла	7 6
25ХГСА 30ХГСА	Закалка и отпуск после сварки на $\sigma_b \leq 90$ кгс/мм ²	Э70 Э85		0,9 σ_b основного металла	6 5
25ХГСА 30ХГСА	Закалка и отпуск после сварки на $\sigma_b \geq 90$ кгс/мм ²	Э85		0,9 σ_b основного металла при толщине до 10 мм, 90 при толщине 10 ... 20 мм, 80 при толщине > 20 мм	5
25ХГСА 30ХГСА	Сварка в упрочнённом состоянии без последующей термообработки	Э – 11Х15Н25М6АГ2		10052 - 75	60 при толщине до 10 мм, 55 при толщине 10 ... 20 мм, 50 при толщине > 20 мм
12Х2НВФА	Закалка и отпуск после сварки на $\sigma_b \geq 100$ кгс/мм ²	Э85 Э100	9467 – 75	0,9 σ_b основного металла	6 5
12Х2НВФА	Сварка в упрочнённом состоянии без последующей термообработки	Э – 11Х15Н25М6АГ2	9467 – 75 10052 - 75	90 60	6 10
23Х2НВФА	Закалка и отпуск после сварки на $\sigma_b \geq 115$ кгс/мм ²	Э85	9467 – 75	0,9 σ_b основного металла	6
23Х2НВФА	Сварка в упрочнённом состоянии без последующей термообработки	Э85 Э – 11Х15Н25М6АГ2	9467 – 75 10052 - 75	110 60	5 10
30ХГСНА	Закалка и отпуск после сварки на $\sigma_b \geq 160 \dots 180$ кгс/мм ²	Э85 Э100	9467 – 75	120 при толщине 4 ... 10 мм, 100 при толщине 10 ... 15 мм, 90 при толщине 15 – 20 мм, 80 при толщине > 20 мм	5
30ХГСНА	Сварка в упрочнённом состоянии без последующей термообработки	Э – 11Х15Н25М6АГ2 Э – 06Х1911Г2М2*	10052 - 75	60 при толщине 4 ... 15 мм, 55 при толщине 15 ... 20 мм, 50 при толщине > 20 мм	10

* Только по слоям, наплавленным присадками типа Э – 11Х15Н25М6АГ2



3.1 Ручная дуговая сварка

Детали из стали 30ХГСНА с жёсткими замкнутыми швами и толщиной свариваемых элементов **более 15 мм** в случае образования трещин при применении электродов типа Э - 11Х15Н25М6АГ2 сваривают по определённой технологии.



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ НАЛОЖЕНИЯ ВАЛИКОВ ПРИ СВАРКЕ СТАЛИ 30ХГСМА АУСТЕНИТНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ.

1. Перед сваркой на кромки сварного соединения наплавляют слой толщиной 2 - 3 мм электродами типа Э - 11Х15Н25М6АГ2 (рис. а).
2. Сварку по наплавленным слоям производят электродами типа Э - 06Х19Н11Г2М2 (рис. б).

Швы выполненные электродами типа Э - 11Х15Н25М6АГ2, имеют предел прочности 500 ... 600 МПа.



3.2 Автоматическая сварка под флюсом

Автоматическая сварка под флюсом

рекомендуется при толщине свариваемого металла свыше 4 мм при изготовлении конструкций с прямолинейными и кольцевыми швами.



Автоматическая сварка под флюсом

При толщине свариваемого металла менее 4 мм наблюдается коробление и увеличенное число дефектов в шве. Автоматическую сварку под флюсом можно выполнять как с разделкой кромок при большой толщине деталей, так и без неё.

Для предупреждения прожогов при односторонней сварке применяют остающиеся стальные и съёмные подкладки. Подкладные кольца и замковые соединения не рекомендуются, так как они снижают надёжность изделия в эксплуатации, являясь концентраторами напряжений. Вместо подкладных колец первые слои целесообразно выполнять аргонодуговой сваркой на вес



3.2 Автоматическая сварка под флюсом

Присадочные материалы при сварке под флюсом и механические свойства сварных соединений

Марка свариваемой стали	Термическая обработка	Электродная проволока		Марка флюса	σ_b , кгс/мм ²	$\alpha_{ш}$, (кгс · м)/см ²	
		Марка	ГОСТ или ТУ		не менее		
45	Без термической обработки или закалка и отпуск после сварки	Св – 08А	ГОСТ 2246 – 70	ОЦ – 45 АН – 348 – А	0,9 σ_b основного металла	–	
10Г2А 12Г2А	Без термической обработки или с последующей нормализацией	Св – 08А, Св – 08ГА, Св – 18ХМА		АН – 15 АН – 348 – А	0,9 σ_b основного металла	6	
25ХГСА 30ХГСА	Закалка и отпуск для стали 25ХГСА на $\sigma_b = 110 \pm 10$ кгс/мм ² , для стали 30ХГСА на $\sigma_b = 120 \pm 10$ кгс/мм ² после сварки	Св – 18ХМА		АН – 15 АН – 348 – А	0,9 σ_b основного металла	5 4	
25ХГСА 30ХГСА	То же, до сварки	Св – 10Х16Н25АМ6		АН – 15	60	10	
12Х2НВФА 23Х2НВФА	Без последующей термической обработки (сварка в упрочнённом состоянии); закалка и отпуск для стали 12Х2НВФА $\sigma_b \geq 100$ кгс/мм ² ; для стали 23Х2НВФА $\sigma_b \geq 115$ кгс/мм ² после сварки	Св – 18ХМА		АН – 348 – А	0,9 σ_b основного металла	6 для 12Х2НВФА 4 для 23Х2НВФА	
30ХГСНА	Закалка и отпуск на $\sigma_b = 160 \dots 180$ кгс/мм ² : после сварки	0Х4МА Св – 18ХМА		ЧМ ТУ ЦНИИЧМ 1033 – 63 ГОСТ 2246 – 70	АН – 15	120 90	4 6
30ХГСНА	до сварки	Св – 10Х16Н25М6		ГОСТ 2246 – 70	АН – 15	60	10
28Х3СНМВФА	Закалка + отпуск на $\sigma_b \geq 170$ кгс/мм ² после сварки	Св – 28Х3СНМВФАВД Св – 20ХСНВФА	ТУ 14 – 1 – 467 – 72	АВ – 5 или 48 – ОФ – 10	0,9 σ_b основного металла	7 ... 8	
30Х2ГСНВМ	Закалка + отпуск на $\sigma_b = 170 \pm 10$ кгс/мм ² после сварки	Св – 20Х2ГСНВМ Св – 20ХСНВФА	ЧМТУ 1 – 789 – 69 ТУ 14 – 1 – 467 – 72	АВ – 5 или 48 – ОФ – 10	0,9 σ_b основного металла	–	



3.3 Сварка в защитных газах

Дуговую сварку в защитных газах углеродистых и среднелегированных конструкционных сталей можно осуществлять как в инертных, так и в активных газах. Сварка производится неплавящимся вольфрамовым и плавящимися электродами.

При сварке в углекислом газе применяют только плавящиеся электроды.

чистые вольфрамовые прутки марки ЭВЧ и вольфрамовые электроды с активирующими добавками марок ЭВЛ, ЭВИ, ЭВТ по ГОСТ 2349 – 80;

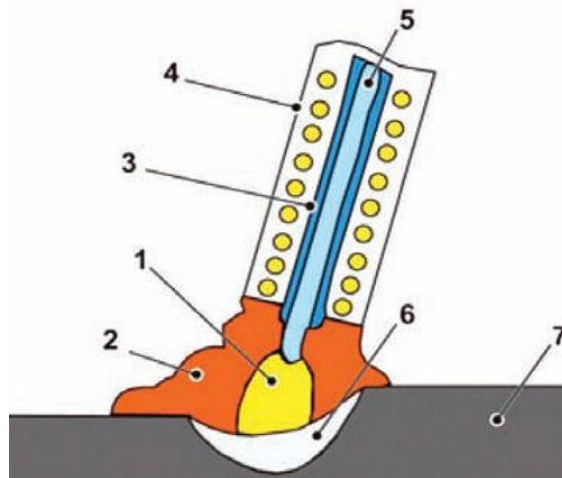
при сварке на переменном токе применяют чистые вольфрамовые прутки марки ЭВЧ.

В качестве неплавящихся электродов для ручной и автоматической сварки на постоянном токе прямой полярности используют:

В качестве инертных газов используют аргон первого и второго сорта по ГОСТ 10157 – 79 и технический гелий по ТУ – 51 – 940 – 80

3.3 Сварка в защитных газах

Неплавящимся электродом рекомендуется сваривать конструкции из стали толщиной **не более 4 ... 5 мм**. Для стали толщиной **до 2 мм** применяется автоматическая аргонодуговая сварка неплавящимся электродом без присадки или с присадочной проволокой, целесообразна **сварка импульсной дугой**.



Сварка вольфрамовыми электродами в среде защитного газа - аргона
 1. Сварочная дуга; 2. Газовая защита; 3. Зажим электрода; 4. Сопло; 5. Тугоплавкий электрод; 6. Сварочная ванна; 7. Металл шва

Во избежание перегрева сварного соединения и уменьшения его деформации применяют **импульсно-дуговую сварку вольфрамовым электродом** на постоянном токе прямой полярности. Проплавляющая способность импульсной дуги выше проплавляющей способности постоянно горячей дуги.

Проплавляющая способность импульсной дуги выше проплавляющей способности постоянно горячей дуги.

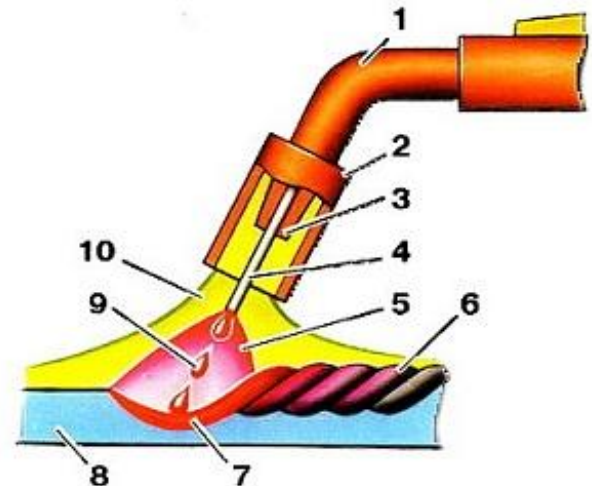


3.3 Сварка в защитных газах

Сварку плавящимся электродом в аргоне можно применять при изготовлении конструкций из сталей толщиной 4 мм и выше.



- 1 - Горелка
- 2 - Сопло
- 3 - Токосоводящий наконечник
- 4 - Электродная проволока
- 5 - Сварочная дуга
- 6 - Сварной шов
- 7 - Сварочная ванна
- 8 - Основной металл
- 9 - Капли электродного металла
- 10 - Газовая защита



Сварка плавящимся электродом алюминия в защитном газе

Для получения качественных сварных соединений конструкционных закаливающих сталей больших толщин (до 80 ... 100 мм) применяют импульсно-дуговую сварку плавящимся электродом в щелевой зазор между кромками. Диаметр проволоки 1,6 ... 2 мм.



3.3 Сварка в защитных газах

При использовании сварных конструкций из среднелегированных высокопрочных сталей находит преимущественное применение **сварка в углекислом газе**.

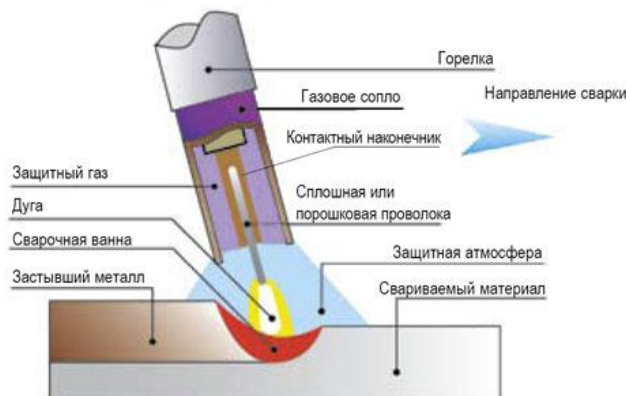


Схема полуавтоматической сварки

Металл толщиной до 6 мм можно сваривать без предварительного подогрева, но с обязательным последующим отпуском сразу же после сварки. При большей толщине металла и жёсткости конструкции необходим подогрев до 200 ... 300 °С.

К технологическим особенностям сварки в углекислом газе следует отнести тщательную осушку газа с целью предельного снижения содержания водорода в металле шва, а также использование режимов сварки, обеспечивающих пониженные скорости остывания сварных соединений



3.4 Электрошлаковая сварка

Сварные соединения толстолистовых конструкций (сосуды высокого давления) из среднелегированных сталей, подвергающиеся последующей термической обработке, наиболее целесообразно выполнять электрошлаковой сваркой.



Автомат для электрошлаковой наплавки

Наряду с высокой производительностью и экономичностью сварочных работ обеспечивается высокое качество сварных соединений, главным образом, благодаря высокой стойкости металла околошовной зоны и шва против образования трещин.

Однако при неблагоприятных условиях при электрошлаковой сварке могут возникнуть кристаллизационные трещины в металле шва, а также горячие и холодные трещины типа отколов в участке перегрева околошовной зоны



3.4 Электрошлаковая сварка

Наиболее действенными технологическими мерами предупреждения подобных дефектов являются следующие:



применение режимов сварки, обеспечивающих применение широких швов с глубоким проплавлением; предварительный подогрев до температуры 150 ... 200 °С;

использование для изготовления толстостенных конструкций сталей, микролегированных церием, титаном, алюминием и другими активными по отношению к вредным примесям элементами, которые связывают примеси в тугоплавкие дисперсные соединения, равномерно распределённые в свариваемом металле.

Для устранения перегрева в околошовной зоне можно использовать специальный метод электрошлаковой сварки, предусматривающий наплавку на кромки слоя металла, стойкого против перегрева.



3.4 Электрошлаковая сварка

Для электрошлаковой сварки среднелегированных сталей применяют флюсы АН – 8, АН – 22 и сварочные проволоки Св – 10Г2, Св – 08ГСМТ, Св – 18ХМА, Св – 10Х5М и др.

Внешний вид флюсов для электрошлаковой сварки



Повышение содержания углерода и некоторых легирующих элементов в шве достигается за счёт увеличения доли основного металла в металле шва. При использовании рекомендуемых режимов сварки эта доля превышает 50 %. Для упрочнения сварных соединений применяют печную или местную термообработку.



Задание для самостоятельного изучения:



Состав и свойства высокохромистых мартенситных сталей

Акулова А.И., Бельчука Г.А., Демянцевич В.П. Технология и оборудование сварки плавлением. Учебник для студентов вузов. М., «Машиностроение», 1977. – 432 с. (С. 258-262)





Кафедра технології металлов и матеріалознавства

Лузан Сергей Алексеевич

E-mail: khadi.luzan@gmail.com

г. Харьков, ул. Петровского, 25, ХНАДУ, КАФЕДРА ТМ и М

Тел. 097-174-19-15