

## 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 закаливающих сталей.  
(тема 5)**

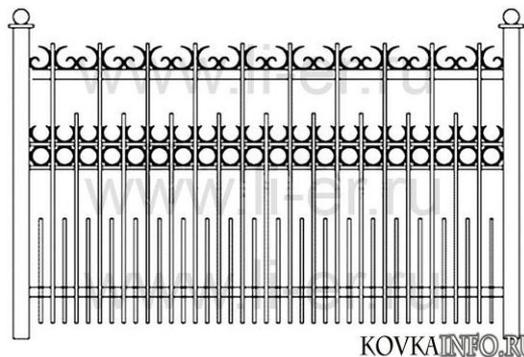
**План лекции**

- 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 закаливающих 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 ( $\sigma_B$  и  $\sigma_T$ ) и снижается пластичность ( $\delta$ ,  $\psi$ ). 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.)

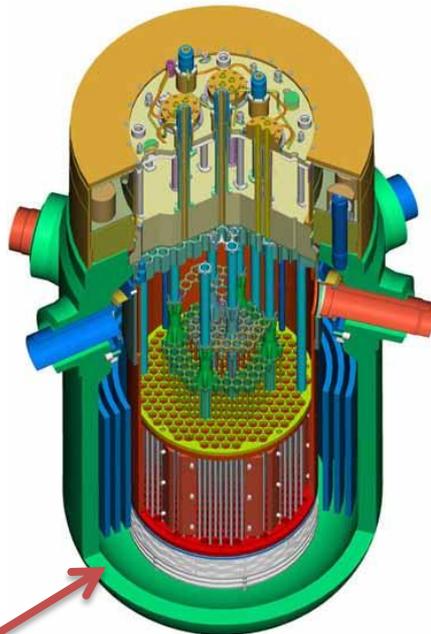
Для современных легированных сталей характерно многокомпонентное комплексное легирование. Оно более экономично и позволяет, получить стали с более высокими механическими свойствами. Временное сопротивление разрыву после упрочняющей ТО составляет 600-2000 МПа.

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.

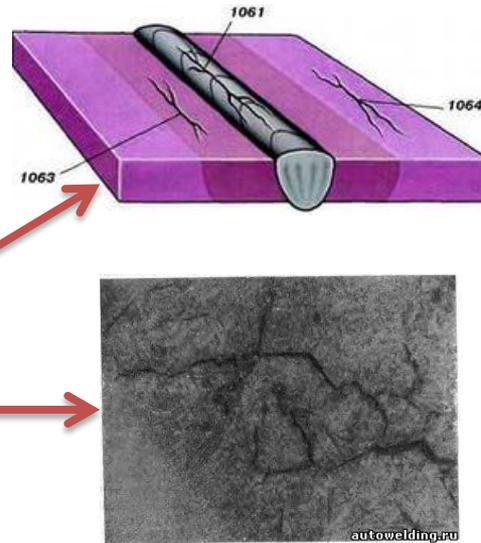
В соответствии с условиями длительной работы под напряжением, при высоких температурах теплоустойчивые стали должны обладать сопротивлением ползучести, длительной прочностью, стабильностью свойств во времени и жаростойкостью.

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  $C_{\Sigma}$** , 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:

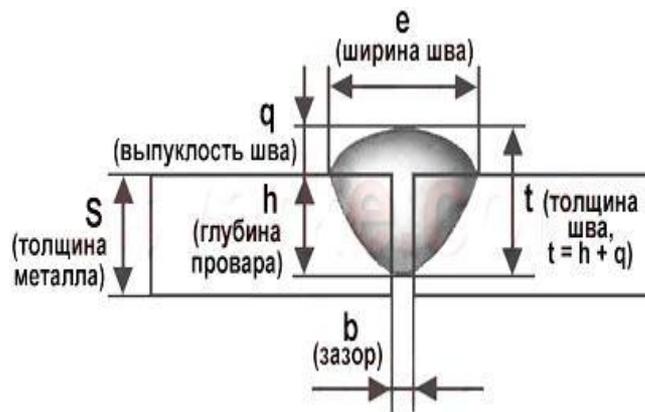
1. Снизить содержание в шве серы, углерода и других элементов, уменьшающих стойкость металла шва против образования кристаллизационных трещин;

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

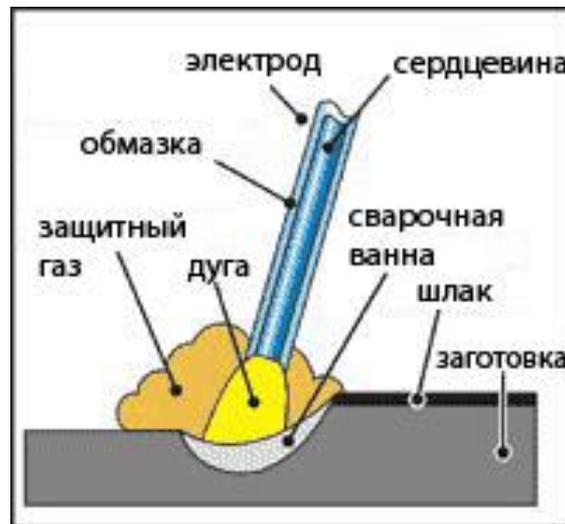
Равнопрочность сварных соединений достигается подбором сварочных материалов, дополнительным легированием металла шва элементами (Mn, Cr, Ti), повышающими прочность и стойкость металла против кристаллизационных трещин и последующей термической обработкой.



### 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	$\sigma_{в'}$ кгс/мм <sup>2</sup>	$\alpha_{н'}$ (кгс · м)/см <sup>2</sup>
45	Без термообработки или закалка и отпуск после сварки	Э55	9467 – 75	0,9 $\sigma_{в}$ основного металла	12
10Г2А 12Г2А	Без термообработки или с последующей нормализацией	Э60 Э70		0,9 $\sigma_{в}$ основного металла	7 6
25ХГСА 30ХГСА	Закалка и отпуск после сварки на $\sigma_{в} \leq 90$ кгс/мм <sup>2</sup>	Э70 Э85		0,9 $\sigma_{в}$ основного металла	6 5
25ХГСА 30ХГСА	Закалка и отпуск после сварки на $\sigma_{в} \geq 90$ кгс/мм <sup>2</sup>	Э85		0,9 $\sigma_{в}$ 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 $\sigma_{в} \geq 100$ кгс/мм <sup>2</sup>	Э85 Э100	9467 – 75	0,9 $\sigma_{в}$ 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 $\sigma_{в} \geq 115$ кгс/мм <sup>2</sup>	Э85	9467 – 75	0,9 $\sigma_{в}$ 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 $\sigma_{в} \geq 160 \dots 180$ кгс/мм <sup>2</sup>	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 30ХГСНА 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	$\sigma_b$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\alpha_{цн}$ (кгс · м)/см <sup>2</sup>	
		Марка	ГОСТ или ТУ				
45	Без термической обработки или закалка и отпуск после сварки	Св – 08А	ГОСТ 2246 – 70	ОЦ – 45 АН – 348 – А	0,9 $\sigma_b$ основного металла	–	
10Г2А 12Г2А	Без термической обработки или с последующей нормализацией	Св – 08А, Св – 08ГА, Св – 18ХМА		АН – 15 АН – 348 – А	0,9 $\sigma_b$ основного металла	6	
25ХГСА 30ХГСА	Закалка и отпуск для стали 25ХГСА на $\sigma_b = 110 \pm 10$ кгс/мм <sup>2</sup> , для стали 30ХГСА на $\sigma_b = 120 \pm 10$ кгс/мм <sup>2</sup> после сварки	Св – 18ХМА		АН – 15 АН – 348 – А	0,9 $\sigma_b$ 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 <sup>2</sup> ; для стали 23Х2НВФА $\sigma_b \geq 115$ кгс/мм <sup>2</sup> после сварки	Св – 18ХМА		АН – 348 – А	0,9 $\sigma_b$ основного металла	6 для 12Х2НВФА 4 для 23Х2НВФА	
30ХГСНА	Закалка и отпуск на $\sigma_b = 160 \dots 180$ кгс/мм <sup>2</sup> : 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 <sup>2</sup> после сварки	Св – 28Х3СНМВФАВД Св – 20ХСНВФА	ТУ 14 – 1 – 467 – 72	АВ – 5 или 48 – ОФ – 10	0,9 $\sigma_b$ основного металла	7 ... 8	
30Х2ГСНВМ	Закалка + отпуск на $\sigma_b = 170 \pm 10$ кгс/мм <sup>2</sup> после сварки	Св – 20Х2ГСНВМ Св – 20ХСНВФА	ЧМТУ 1 – 789 – 69 ТУ 14 – 1 – 467 – 72	АВ – 5 или 48 – ОФ – 10	0,9 $\sigma_b$ 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;

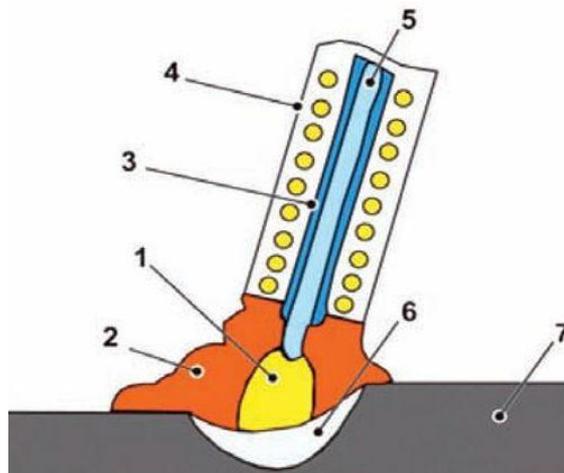
при сварке на переменном токе применяют чистые вольфрамовые прутки марки ЭВЧ.

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.

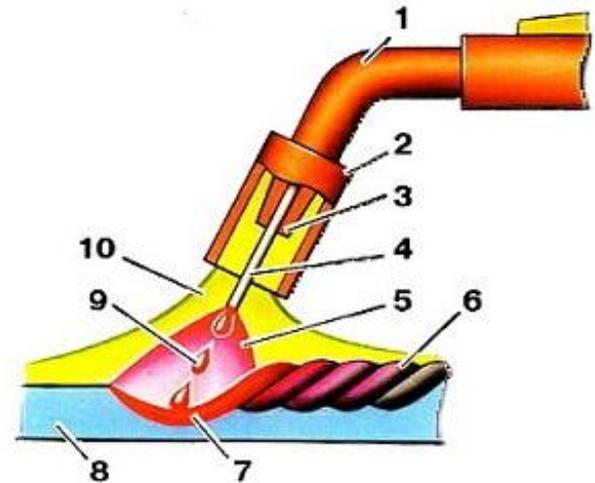


## 3.3 Сварка в защитных газах

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



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



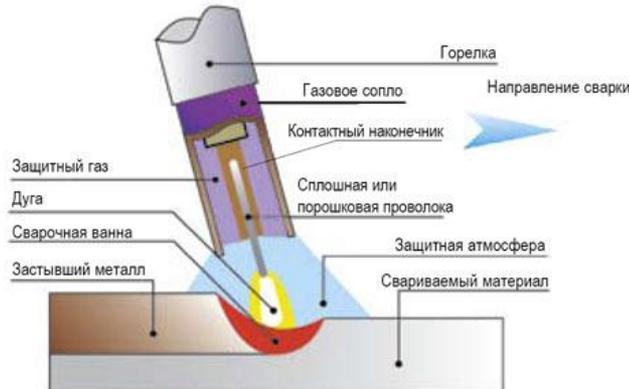
### Сварка плавящимся электродом алюминия в защитном газе

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](mailto:khadi.luzan@gmail.com)**

**г. Харків, ул. Петровського, 25, ХНАДУ, КАФЕДРА ТМ и М**

**Тел. 097-174-19-15**