



# 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 13. Сварка  
высоколегированных  
аустенитных сталей и сплавов.  
(тема 5)**

**План лекции**

- 1. Основные свойства и классификация.  
Области применения**
- 2. Особенности сварки и свариваемость сталей**
- 3. Технология и техника сварки хромо-никелевых  
аустенитных сталей**



# 1. Основные свойства и классификация. Области применения

Существующие **высоколегированные аустенитные стали, и сплавы** различают по содержанию основных легирующих элементов – **хрома и никеля** и по **составу основы сплава**.



**Выплавка аустенитных сталей**

**Высоколегированными аустенитными сталями** считают сплавы на основе железа, легированные различными элементами, в количестве **до 55 %**, в которых содержание основных легированных элементов – **хрома и никеля** обычно не выше **15 % и 7 %** соответственно.

К **аустенитным сплавам** относят железоникелевые сплавы с содержанием никеля к железу **1 : 1,5** и никелевые сплавы с содержанием никеля не менее **55 %**.



# 1. Основные свойства и классификация. Области применения

**Высоколегированные аустенитные стали и сплавы классифицируют:**

**По системе легирования**  
(хромоникелевые, хромомарганцевые, хромоникельмолибденовые, хромоникельмарганцевые стали)

**По структурному классу**  
(аустенитные, аустенитно-ферритные и аустенитно-молибденовые стали)

**По свойствам и служебному назначению**  
(коррозионностойкие, жаропрочные, жаростойкие стали).



# 1. Основные свойства и классификация. Области применения



Химическом машиностроении



Ракетной и атомной технике



Нефтяном машиностроении



Криогенной технике



цистерна типа ЦТК-1,6/0,25  
для транспортировки, хранения и выдачи  
жидких азота, аргона, кислорода

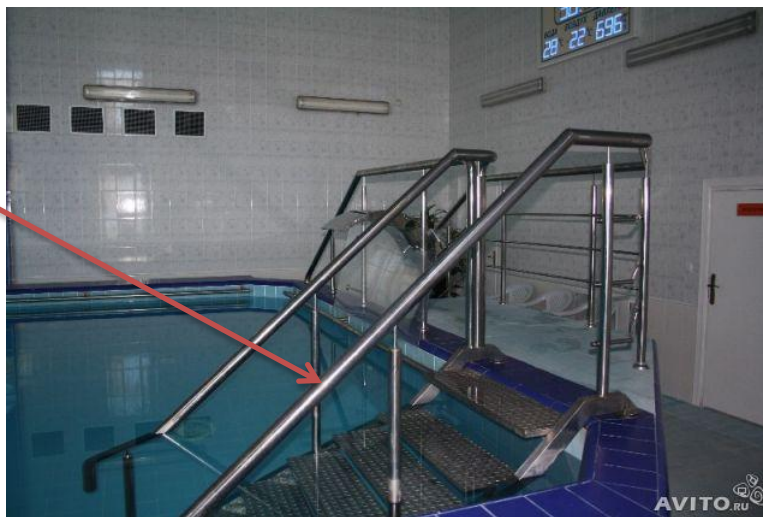


Энергетическом машиностроении

# 1. Основные свойства и классификация. Области применения

## Коррозионно-стойкие стали

характерны  
пониженным  
содержанием  
углерода (не  
более 0,12 %).



При соответствующем легировании и термической обработке стали, обладают **высокой коррозионной стойкостью при 20 °С и повышенной температуре**, как в газовой среде, так и в водных растворах кислот, щелочей и в жидкометаллических средах

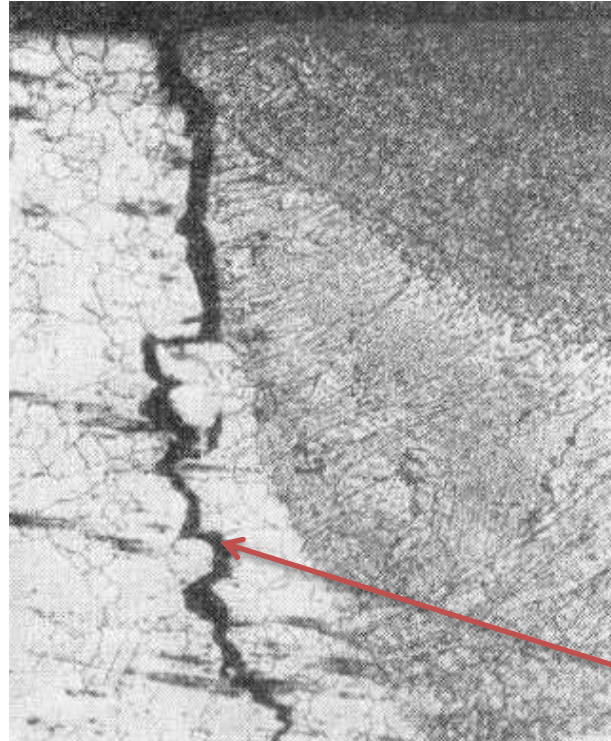
**Основные марки коррозионно-стойких сталей:** 07X16H6, 08X22H6T, 08X20H14C2, 08X21H6M2T, 08X18H10, 12X18H10T, 08X18H12T, 10X17H13M2T, 10X23H18, ХН65МВ





# 1. Основные свойства и классификация. Области применения

**Жаропрочные стали,** обладают высокими механическими свойствами при повышенных температурах и способностью **выдерживать нагрузки при нагреве** в течение длительного времени.



Для придания этих **свойств** стали и сплавы легируют элементами – упрочнителями – **молибденом и ванадием** (до 7 % каждого).

Микроструктура трещины в околошовной зоне сварного соединения жаропрочной стали 1X18H12T

**Важной легирующей присадкой является бор,** способствующий измельчению зерна (12X18H12T, 08X16H13M2Б, 20X20H14C2, 12X25H16Г7AP, 10X14H14B2M, 10X15H35BT и др.).

# 1. Основные свойства и классификация. Области применения

Жаростойкие стали, и сплавы обладают стойкостью против химического разрушения поверхности в газовых средах при температурах до 1100 ... 1150 °С.



Муфельная печь  
(Жаростойкая сталь 20Х23Н18)

Высокая окислостойкость этих сталей и сплавов достигается легированием алюминием (до 2,5 %) и кремнием, способствующими созданию прочных и плотных окислов на поверхности деталей, предохраняющих металл от контакта с газовой средой

Обычно их используют для слабонагруженных элементов нагревательных печей, печной арматуры, газопроводных систем (20Х23Н18, 20Х20Н14С2, 08Х20Н14С2, 45Х15Г14СЮ, ХН38Т и др.)





# 1. Основные свойства и классификация. Области применения

**Аустенитные стали и сплавы обладают комплексом особых свойств: высокими прочностными и пластическими свойствами:  
 $\sigma_{\text{в}} = 500 \dots 1100 \text{ МПа}$ ;  $\delta = 20 \dots 40 \%$ .**

Поэтому одну и ту же сталь можно использовать как

Коррозионностойкую и хладостойкую

Коррозионностойкую и жаростойкую

Жаростойкую и жаропрочную



## Типовые механические свойства некоторых марок высоколегированных аустенитных и аустенитно–ферритных сталей и сплавов

Марка стали	Термическая обработка	$\sigma_B$	$\sigma_T$	$\delta$ , %
		МПа		
08X18H10	Закалка 1050 ... 1100 °С, охлаждение на воздухе, в масле или воде	480	200	40
12X18H12T		550	200	40
10X17H13M2T		520	220	40
08X18H12Б		500	180	40
10X14Г14Н4Т	Закалка 950 ... 1050 °С, охлаждение на воздухе	650	250	35
08X21H5Т	Закалка 1050 ... 1100 °С, охлаждение на воздухе, в масле или воде	550	350	25
08X21H6M2Т	Закалка 1000 ... 1080 °С, охлаждение на воздухе, в масле или воде	700	450	25
09X17H7Ю	Закалка 1030 ... 1070 °С, охлаждение на воздухе; первый отпуск 740 ... 760 °С; повторный 550 ... 600 °С, охлаждение на воздухе	700	350	10
20X23H18	Закалка 1100 ... 1150 °С, охлаждение на воздухе, в масле или воде	500	200	35
20X25H20C2	Закалка 1100 ... 1150 °С, охлаждение на воздухе, в масле или воде	600	300	35
ХН67МВТЮ	Закалка 1200 °С на воздухе, старение при 850 °С, 154	1000 ... 1100	550 ... 750	20 ... 30

## 2. Особенности сварки и свариваемость сталей

**Хромоникелевые аустенитные стали**, обладают хорошей свариваемостью, **не склонны к образованию холодных трещин в околошовной зоне**, при их сварке **не требуется предварительный или сопутствующий подогрев.**

Однако при сварке хромоникелевых сталей приходится преодолевать трудности, к числу которых относятся:

Обеспечение стойкости металла шва и околошовной зоны против образования **горячих трещин**

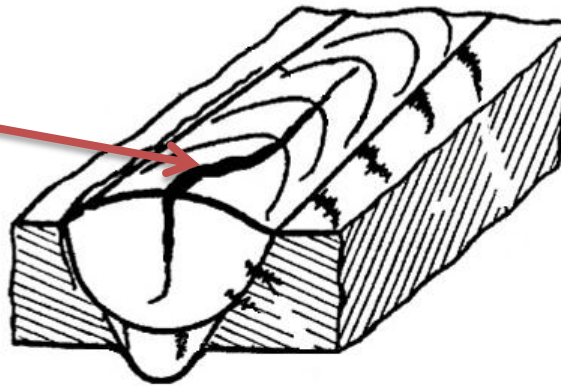
Обеспечение **коррозионной стойкости** сварных соединений

Получение **плотных швов**

Получение и **сохранение в процессе эксплуатации** требуемых свойств сварного соединения

## 2. Особенности сварки и свариваемость сталей

Хромоникелевые аустенитные стали подвержены, горячим трещинам, возникающим в процессе сварки и после сварки.

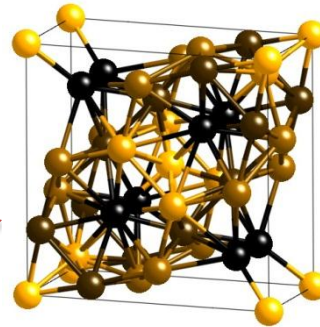
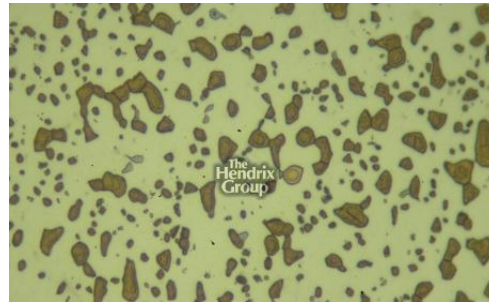


Применение электродов с основным покрытием и высокоосновных флюсов, шлаки которых рафинируют металл шва и иногда модифицируют его структуру, повышает стойкость к горячим трещинам.

К технологическим мерам повышения стойкости против горячих трещин относятся: обеспечение умеренной погонной энергии сварки и режима, наиболее благоприятной формы шва (узкий шов) и направленности кристаллизации (минимальный угол между направлением кристаллитов в центре шва и его продольной осью); частые продольные колебания электрода в пределах длины ванны.

## 2. Особенности сварки и свариваемость сталей

Хромоникелевые аустенитные стали типа 25–20 (25 % Cr и 20 % Ni) склонны к охрупчиванию сварных соединений из-за образования хрупкой твёрдой структурной немагнитной составляющей  $\sigma$ -фазы в результате длительного нагрева в интервале температур 650 ... 875 °C.



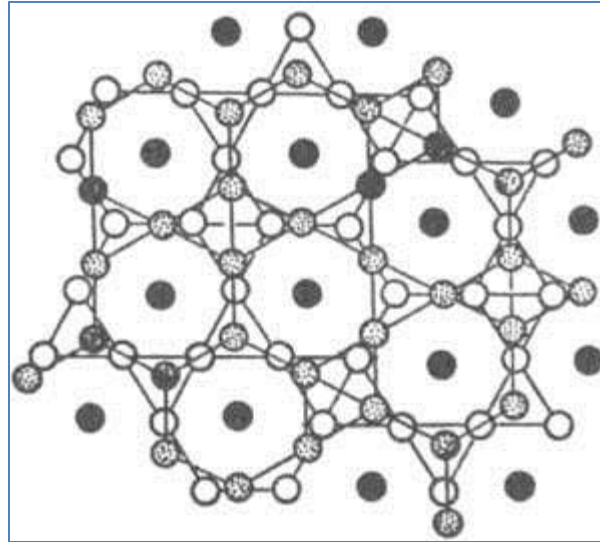
**Сигма-фаза**

Сигма-фаза представляет собой интерметаллид типа FeCr с переменным химическим составом и сложной кристаллической решёткой. Образуется она в результате протекания диффузионных процессов в твёрдом металле.

Сигма-фаза может образовываться непосредственно из аустенита по схеме  $\gamma \rightarrow \sigma$  или в двух фазных швах из феррита по схеме  $\alpha(\delta) \rightarrow \sigma$ . В сварных швах сигма-фаза выпадает преимущественно по границам столбчатых кристаллитов аустенита

## 2. Особенности сварки и свариваемость сталей

В аустенитно–ферритных швах интервал температур образования **сигма–фазы** значительно **шире**, и скорость протекания превращений выше, чем в однофазных аустенитных швах.



***Сигма–фаза***

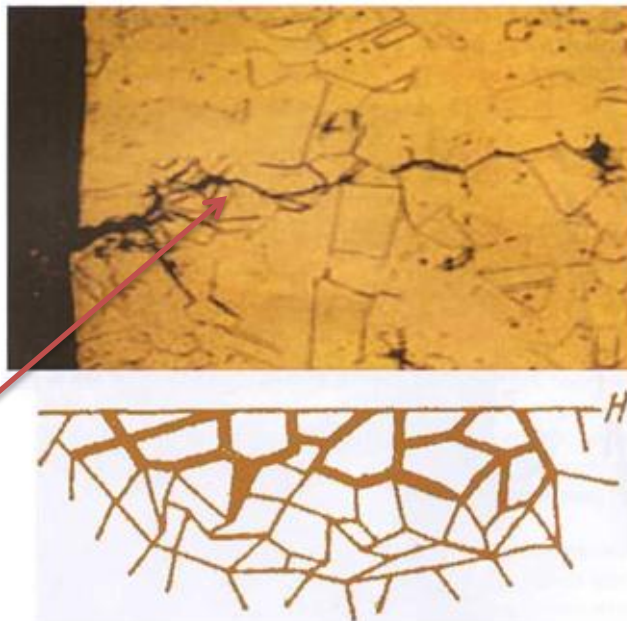
Эффективным средством предотвращения образования **сигма–фазы** является **нагрев сварных соединений до температуры 1050 – 1100 °С с последующим быстрым охлаждением.**

Применительно к двухфазным аустенитно–ферритным швам **сигматизацию** можно предупредить также **ограничением в них содержания первичного феррита (не ниже 20 %)**. Чтобы предотвратить **сигматизацию** чисто аустенитных швов, необходимо по возможности **ограничивать в них содержание молибдена, ванадия, вольфрама, хрома и кремния, а также повышать концентрацию углерода и азота.**



## 2. Особенности сварки и свариваемость сталей

Хромоникелевые аустенитные стали подвержены опасному виду коррозионного разрушения, межкристаллической коррозии (МКК).



После воздействия на сталь или шов кристаллических температур (500 ... 800 °C) выпадают комплексные карбиды железа и хрома.

Выпадение этих карбидов влечёт за собой обеднение хромом (ниже 12 %) пограничных слоёв зёрен или кристаллитов твёрдого раствора и соответствующую потерю коррозионной стойкости металла.

## 2. Особенности сварки и свариваемость сталей

16

**Известны следующие средства борьбы с МКК при сварке высоколегированных аустенитных сталей и сплавов**

**Снижение содержания углерода в основном металле и в металле шва до 0,02-0,03 %**, т. е. до предела его растворимости в аустените (углерод остаётся в твёрдом растворе при любой температуре, и выпадение карбидов хрома исключается)

**Легирование сталей и швов титаном, ниобием, танталом, цирконием, ванадием**, которые дают устойчивые карбиды. В результате карбиды хрома не образуются.

**Закалка сталей от 1050-1100 °С**. При нагреве под закалку карбиды хрома растворяются в аустените, а быстрое остывание фиксирует, однородное строение стали или сплава.

**Стабилизирующий отжиг** в течение 2-3 часов при 850-900 °С с охлаждением на воздухе приводит к наиболее полному выпадению карбидов и стабилизации их состава.

**Повышение в сварных швах содержания феррита до 20-25 % путём дополнительного легирования их хромом и такими элементами, как кремний, алюминий, ванадий, молибден, вольфрам, относящихся к ферритизаторам.**

## 3. Технология и техника сварки хромо- никелевых аустенитных сталей

### 3.1 Ручная дуговая сварка металлическими покрытыми электродами

Основной особенностью ручной дуговой сварки аустенитных сталей является обеспечение требуемого химического состава металла шва при различных типах сварных соединений и

пространственных положениях сварки с учётом изменения доли участия основного и электродного металла в металле шва.

Это заставляет корректировать состав покрытия с целью обеспечения необходимого содержания в шве феррита и тем самым предупреждения образования в шве горячих трещин.

## 3. Технология и техника сварки хромо- никелевых аустенитных сталей

### 3.1 Ручная дуговая сварка металлическими покрытыми электродами

Применением **аустенитных электродов с основным покрытием**, уменьшающим угар легирующих элементов, достигается получение металла шва с необходимым химическим составом и структурами.



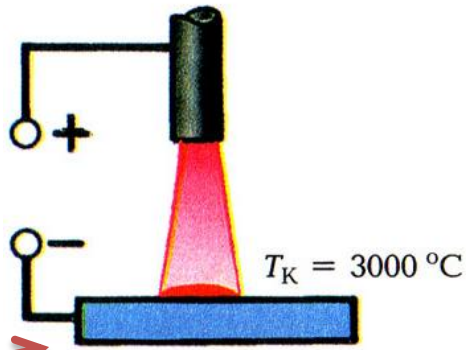
Уменьшению угара легирующих элементов способствует **поддержание короткой дуги** без поперечных колебаний электрода.

**Сварка короткой дугой** уменьшает вероятность дефектов на поверхности основного металла в результате прилипания брызг.

# 3. Технология и техника сварки хромо- никелевых аустенитных сталей

## 3.1 Ручная дуговая сварка металлическими покрытыми электродами

Состав покрытия электродов определяет необходимость применения постоянного тока обратной полярности,



величину которого устанавливают по паспортным данным принятых электродов или назначают с таким расчётом, чтобы отношение тока к диаметру электрода не превышало 25 ... 30 А/мм.

При сварке аустенитными электродами в вертикальном или потолочном положении силу тока уменьшают на 10 ... 30 % по сравнению с этим параметром при сварке в нижнем положении.

## 3. Технология и техника сварки хромо- никелевых аустенитных сталей

### 3.1 Ручная дуговая сварка металлическими покрытыми электродами

Сварку покрытыми электродами рекомендуется выполнять валиками малого сечения и для повышения стойкости против горячих трещин применять электроды диаметром 3 мм с минимальным проплавлением основного металла.

Тщательная прокалка электродов перед сваркой, режим которого определяется их маркой, способствует уменьшению вероятности образования в швах пор и трещин, вызываемых водородом.

Большинство сварных конструкций из жаропрочных аустенитных сталей подвергаются термической обработке: аустенизации при 1050 ... 1100 °С либо аустенизации с последующим стабилизирующим отжигом при 750-800 °С.



## 3. Технология и техника сварки хромо- никелевых аустенитных сталей

### 3.2 Автоматическая сварка под флюсом

Является ведущим технологическим процессом в производстве химической и нефтехимической аппаратуры из коррозионностойких, жаропрочных и жаростойких сталей.

Основным преимуществом этого способа перед ручной дуговой сваркой покрытыми электродами является стабильность состава и свойств металла по всей длине шва при сварке, как с разделкой, так и без разделки кромок.

Это обеспечивается возможностью получения шва любой длины без кратеров, образующихся при смене электродов, равномерность плавления электродной сварочной проволоки и основного металла по длине шва и более надёжной защитой зоны сварки от окисления легирующих элементов кислородом воздуха.

### 3. Технология и техника сварки хромо- никелевых аустенитных сталей

#### 3.2 Автоматическая сварка под флюсом

Техника сварки под флюсом высоколегированных сталей и сплавов практически не отличается от техники сварки конструкционных низкоуглеродистых и низколегированных сталей.



Имеется, однако, ряд специфических особенностей, характерных только для высоколегированных сталей.

1. Преимущественное использование постоянного тока из-за применения фторидных и высокоосновных флюсов, сварка под которыми на переменном токе затруднена.

## 3. Технология и техника сварки хромо- никелевых аустенитных сталей

### 3.2 Автоматическая сварка под флюсом

2. Уменьшение вылета электродной проволоки в 1,5 ... 2 раза по сравнению с вылетом обычной стальной проволоки из-за пониженной теплопроводности и высокого электрического сопротивления, приводящих к ускорению процесса плавления проволоки (вылет не должен превышать 20 ... 30 мм).

3. Выполнение сварки под флюсом швами относительно небольшого сечения, как более стойкими против кристаллизационных трещин, что предопределило преимущественное использование тонкой проволоки диаметром 2 ... 3 мм (при сварке конструкционных сталей - 3 ... 5 мм).

4. Для получения провара такой же глубины, как на углеродистых конструкционных сталях, при сварке под флюсом, а также и других видах сварки плавлением аустенитных сталей и сплавов величину тока следует уменьшать на 10 ... 30 %.

# 3. Технология и техника сварки хромо- никелевых аустенитных сталей

## 3.2 Автоматическая сварка под флюсом

Для сварки под флюсом аустенитных сталей и сплавов используют сварочные проволоки

Выпускаемые по ГОСТ 2246 – 70 и по техническим условиям

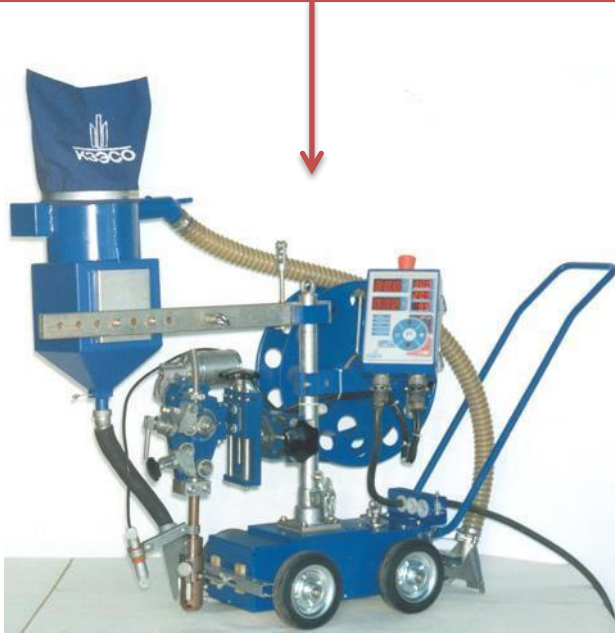
Низкокремнистые фторидные и высокоосновные безфтористые флюсы, создающие в зоне сварки безокислительные или малоокислительные сферы

Сварку под фторидными флюсами производят на постоянном токе обратной полярности, а под высокоосновными безфтористыми флюсами – на постоянном токе прямой полярности

# 3. Технология и техника сварки хромо- никелевых аустенитных сталей

## 3.3 Электрошлаковая сварка

Электрошлаковая сварка хромо никелевых аустенитных сталей производится проволокой диаметром 3 мм или пластинчатыми электродами толщиной 6 ... 20 мм.



Применительно к высоколегированным сталям и сплавам особо ценные технологические свойства электрошлакового процесса – это возможность сварки без разделки кромок, повышение стойкости металла шва против горячих трещин и небольшие коробления при сварке стыковых соединений.

**Недостаток электрошлаковой сварки** – чрезмерный перегрев металла в околошовной зоне, что отрицательно сказывается на свойствах сварных соединений.

## 3. Технология и техника сварки хромо-никелевых аустенитных сталей

### 3.3 Электрошлаковая сварка

Для электрошлаковой сварки коррозионностойких сталей и сплавов

используют в основном фторидные флюсы АНФ – 6, АНФ – 7, АНФ – 8, АНФ – 14, 48 – ОФ – 6 и др.

Для жаростойких сталей – флюсы АНФ – 1П, АНФ – 7, АНФ – 8 и высокоосновной АН – 292. При сварке жаростойких сталей двухфазным швом типа Х25Н13 можно применить низкокремнистые флюсы АНФ – 14 и АН – 26.

Применение для электрошлаковой сварки фторидных безкислородных флюсов гарантирует хорошее усвоение сварочной ванной элементов, обладающих большим сродством к кислороду (титан, марганец и др.). Поэтому в ряде случаев приходится защищать шлаковую ванну путём обдува её аргоном.



## 3. Технология и техника сварки хромо- никелевых аустенитных сталей

### 3.4 Сварка в защитных газах

Сварку в защитных газах можно использовать для соединения материалов различной толщины – от десятых долей до десятков миллиметров.

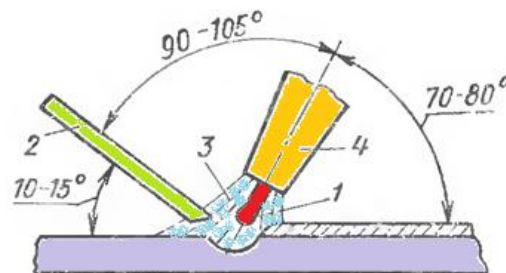
В качестве защитных газов используют инертные (аргон, гелий) и активные (углекислый газ, азот) газы, а также различные смеси инертных или активных газов и инертных с активными.

При сварке в инертных газах повышается стабильность дуги и снижается угар легирующих элементов, что важно при сварке высоколегированных сталей. Сварка в среде защитных газов обеспечивает формирование швов в различных пространственных положениях.

# 3. Технология и техника сварки хромо- никелевых аустенитных сталей

## 3.5 Сварка вольфрамовым электродом

Сварку вольфрамовым электродом производят в аргоне по ГОСТ 10157 – 79 и гелии или смесях и применяют для материала толщиной до 5 ... 7 мм. Однако, например, при сварке неповоротных стыков труб применяют и при большей толщине стыки (до 100 мм и более).



Расположение горелки и присадочного прутка при ручной аргонодуговой сварке: 1 – электрод; 2 - присадочный прутки; 3 - защитный газ; 4 - сопло

В зависимости от толщины и конструкции сварного соединения сварку вольфрамовым электродом производят с присадочным материалом или без него.

Процесс осуществляют вручную с использованием специальных горелок или автоматически на постоянном токе прямой полярности. Исключение составляют, стали и сплавы с повышенным содержанием алюминия, когда для разрушения поверхностной плёнки окислов используют переменный ток.

## 3. Технология и техника сварки хромо- никелевых аустенитных сталей

### 3.5 Сварка вольфрамовым электродом

Сварку выполнять  
непрерывно горячей  
или импульсной дугой.

Импульсная дуга уменьшает протяжённость околошовной зоны и коробление свариваемых кромок, а также обеспечивает хорошее формирование шва на стали малой толщины.

При сварке вольфрамовым электродом в инертных газах погружённой дугой увеличение доли тепла, идущей на расплавление основного металла, позволяет без разделки кромок за один проход сваривать металл повышенной толщины.

# 3. Технология и техника сварки хромо- никелевых аустенитных сталей

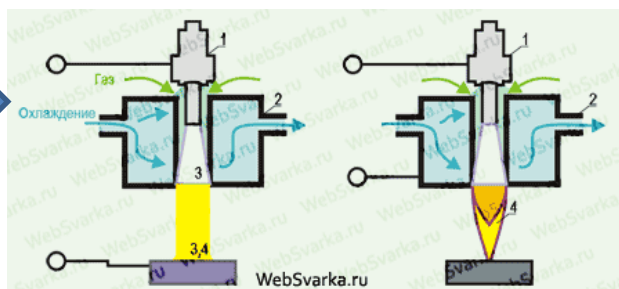
## 3.5 Плазменная сварка

Высоколегированные стали, сваривают плазменной сваркой.

Схемы получения дуговой плазменной струи:

- а - прямого действия;
- б - косвенного действия;
- 1 - вольфрамовый электрод;
- 2 - сопло; 3 – столб дуги;
- 4 - плазменная струя

Плазменную сварку можно использовать как для тонколистовых материалов, так и для металла толщиной до 12 мм.

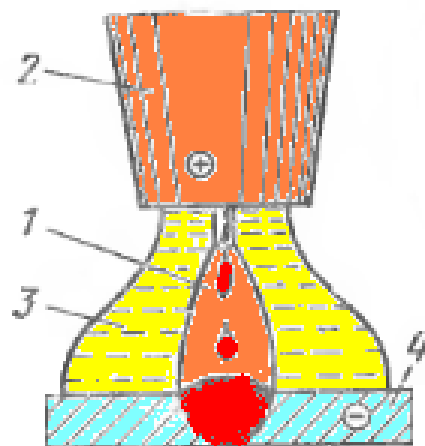


Применение её для соединения сталей большей толщины затрудняется из-за возможности образования в швах подрезов.

## 3. Технология и техника сварки хромо- никелевых аустенитных сталей

### 3.6 Сварка плавящимся электродом

Сварку плавящимся электродом производят в инертных и активных газах или смеси газов.



Дуговая сварка в защитных  
газах

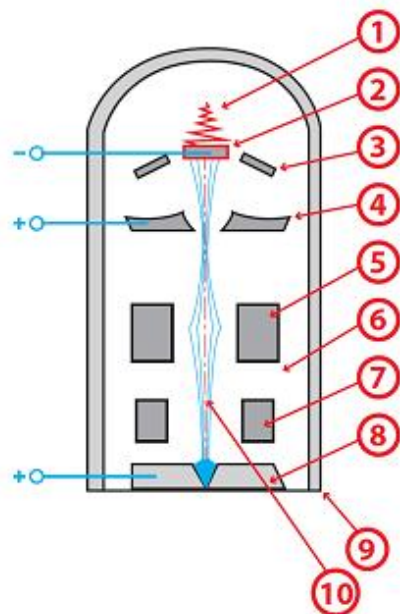
При сварке высоколегированных сталей, содержащих легкоокисляющиеся элементы (алюминий, титан и др), следует использовать инертные газы, преимущественно аргон

Вести процесс на плотностях тока, обеспечивающих **струйный перенос** электродного металла. При струйном переносе дуга имеет высокую стабильность, и практически исключается разбрызгивание металла, что важно для формирования швов в различных пространственных положениях

## 3. Технология и техника сварки хромо- никелевых аустенитных сталей

### 3.7 Электронно–лучевая сварка

Электронно–лучевая сварка обеспечивает возможность за один проход сварить без разделки кромок металл большой толщины.



**Схема  
электронно-лучевой  
сварки:**

- 1 – электрическая спираль,
- 2 – катод,
- 3 – прикатодный электрод,
- 4 – ускоряющий электрод (анод),
- 5 – фокусирующая система,
- 6 – вакуум,
- 7 – отклоняющая система,
- 8 – свариваемое изделие,
- 9 – вакуумная камера,
- 10 – электронный луч

Однако и при этом способе возможно образование в шве и околошовной зоне горячих трещин и локальных разрушений. При глубоком и узком проваре часть газов может задержаться растущими кристаллами в шве и образовать поры. Сварка материала большой толщины затруднена из-за непостоянства глубины проплавления.

# Задание для самостоятельного изучения:



*Сведения о свариваемости аустенитных высоколегированных 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. 286-291)







**Кафедра технології металлов и матеріалознавства**

**Лузан Сергей Алексеевич**

**E-mail: [khadi.luzan@gmail.com](mailto:khadi.luzan@gmail.com)**

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

**Тел. 097-174-19-15**