

# **Сварка титана, циркония и ИХ СПЛАВОВ**

# Сплавы титана и их свариваемость

Титан имеет 2 аллотропической модификации:

- Высокотемпературные –  $\beta$ -титан (ОЦК);
- Низкотемпературные –  $\alpha$ -титан (ГПУ).

Температура полиморфного превращения титана

$T_{\text{полим. превр.}} = 882,5$  град. С.

Плотность  $\alpha$ -титана = 4,506 – 4,56 г/см<sup>3</sup>.

Плотность  $\beta$ -титана = 4,471 г/см<sup>3</sup>.

Легирующие элементы по влиянию на полиморфное превращение титана (температуру превращения, растворимость, стабилизацию той или иной фазы) могут быть разделены на следующие группы:

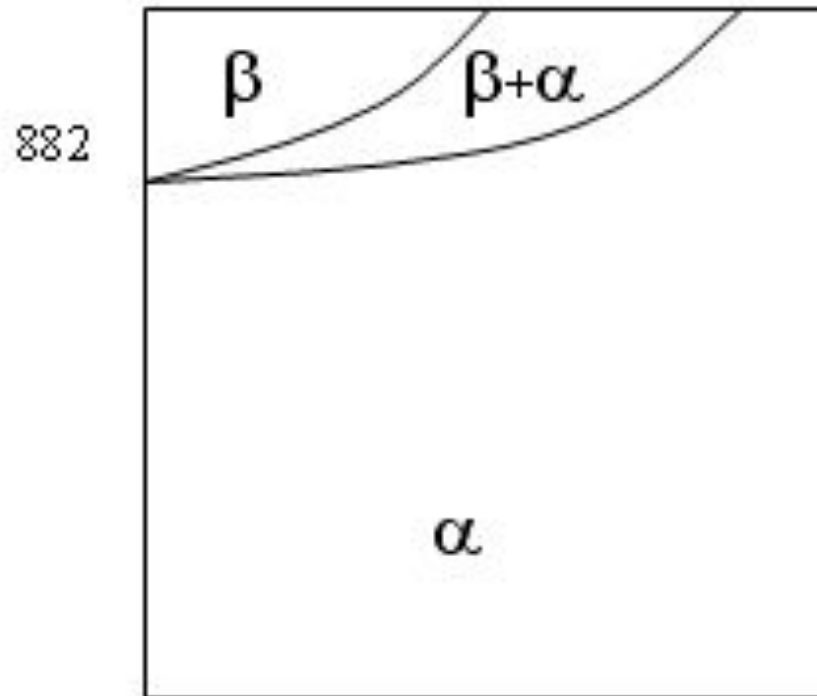
- 1)  $\alpha$  – стабилизаторы;
- 2)  $\beta$  – стабилизаторы;
- 3) нейтральные упрочнители (мало влияют на температуру полиморфного превращения).

Алюминий стабилизирующий альфу фазу является основным легирующим элементом для титана, как углерод для железа.

Алюминий повышает жаропрочность титановых сплавов.

Однако, если содержание алюминия больше либо равно 7,5% (это предел его растворимости в титане) образуется интерметаллид  $Ti_3Al$ , соединение становится очень хрупким.

T, C°

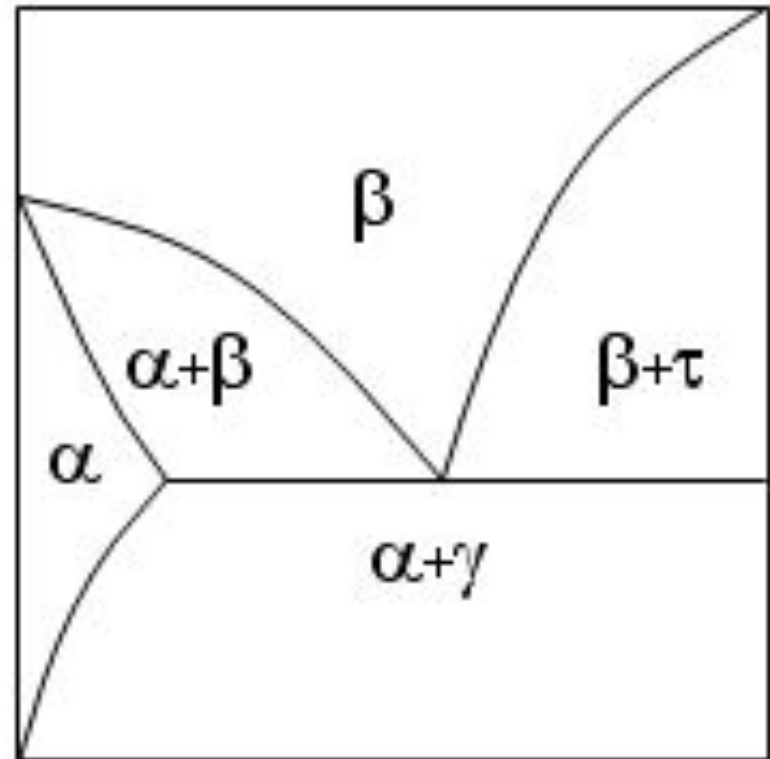
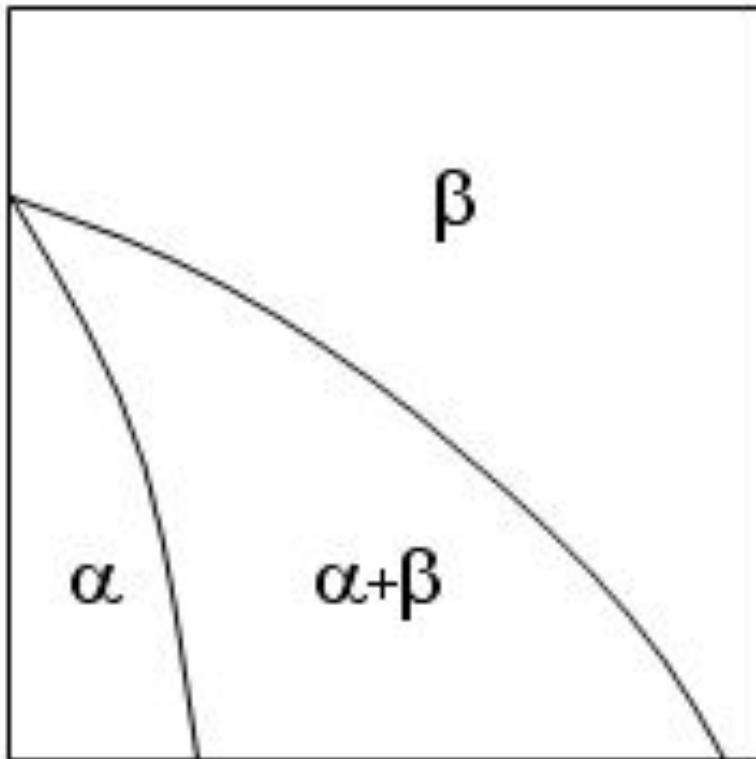


Бета – стабилизаторы делится на две основные группы:

1) Изоморфные (неограниченно растворяющиеся в бета фазе)

V, Nb, Ta, Mo, W;

2) Эвтектоидообразующие обладающие большей, но ограниченной растворимостью в бета фазе, чем в альфа фазе  
Mn; Fe; Cr; Co; Ni; Cu; Si; (Au, Ag).



**$\alpha$  – сплавы**  
**структура чисто  $\alpha$  – фаза**

**ВТ–1–0; ВТ–5 (5% Al); ВТ–5–1 (5% Al,  
2,5% Sn).**

$\alpha + \beta$  – сплавы  
структура и альфа, и бета фазы

**BT6** (6% Al; 4,5% V), **BT14** (4,5% Al; 3% Mo; 1% V), **BT16** (2,5% Al; 5% Mo; 5% V), **BT22** (5% Al; 5% Mo; 5% V; 1% Fe; 1% Cr)

$\beta$  – сплавы

структура представлена механическим  
стабилизатором бета фазой

4201 (33% Mo).



## Псевдо $\alpha$ – сплавы

структура состоит из  $\alpha$  – фазы и  $\beta$  – фазы  
которая меньше 5%.

Это переходный класс:

**OT 4–0** (0,8% Al, 0,8% Mn); **OT 4** (3,5%  
Al, 1,5% Mn); **BT4** (5% Al, 1,5% Mn);  
**BT20** (6% Al, 2% Zr, 1% Mo, 1% V);  
**AT2** (2% Zr, 1% Mo); **TC5** (5% Al, 2%  
Zr, 3% Sn, 2% V).

## Псевдо $\beta$ – сплавы

структура метастабильная  $\beta$  – фаза  
плюс небольшое добавление  $\alpha$  – фазы  
менее 5%.

**BT15** (3% Al, 7% Mo, 1% Cr); **TC6** (3%  
Al, 5% Mn, 6% V, 11% Cr).

# **Характерные сложности при сварке ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

Наиболее высокая активность среди тугоплавких металлов по отношению к кислороду, азоту, водороду ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ ), с которыми они соединяются непосредственно при нагреве с образованием очень устойчивых соединений, вызывая резкое охрупчивание металла. Оксиды и нитриды устойчивы как при низких, так и при высоких температурах

Высокая чувствительность к термическому циклу сварки.

Причина: протекание полиморфного  $\alpha \rightarrow \beta$  превращения, резкий рост зерна высокотемпературной  $\beta$ -фазы, особенно при нагреве выше  $T = 882$  град С. При охлаждении и старении образуются хрупкие фазы, они же образуются и при нагреве.

При сварке титановых сплавов у сварных соединений наблюдается повышенная склонность к замедленному разрушению, так как наблюдается повышенное содержание водорода в сварном соединении совместно с воздействием растягивающих сварочных напряжений (плюс растягивающее усилие от внешней нагрузки) – **водородное охрупчивание.**

Наибольшее влияние водород оказывает на  $\alpha$ -сплавы, т.к. в  $\alpha$ -сплавах растворимость водорода ничтожна ( $<0,001\%$ ).

Растворимость водорода в  $\beta$ -фазе выше на порядок, следовательно сплавы, содержащие  $\beta$ -фазу менее чувствительны к водородному охрупчиванию, но вместе с тем повышая растворимость водорода в  $\beta$ -фазе возрастает опасность наводороживания.

Склонность к водородному растрескиванию увеличивается:

- При повышенном содержании водорода в исходном материале;
- При насыщении водорода в процессе сварки из-за недостаточной подготовке сварочных материалов и кромок;
- При насыщении водородом в процессе технологической обработки сварных соединений и их эксплуатации.



## Радикальными методами по борьбе с трещинообразованием являются:

- Снижение содержания газов в присадке и основном материале  $H_2 < 0,008\%$ ,  $O_2 < 0,1\%$ ,  $N < 0,04\%$ ;
- Соблюдение правильной технологии сварки;
- Рациональный подбор режимов сварки;
- Снятие остаточных сварочных напряжений (стабилизация);
- Предотвращение возможного наводороживания сварных соединений при эксплуатации, путем выбора сплавов такой композиции, которые смогут работать в средах, где имеет место насыщение водородом.

## **Титан имеет высокую склонность к образованию пор в сварных швах**

Растворимость водорода в титане уменьшается с повышением температуры. Поэтому в процессе сварки титана водород диффундирует от зон максимальных температур в менее нагретые области, от шва к основному металлу.

В отличие от сталей, поры в сварных соединениях располагаются цепочкой в зоне сплавления. Они снижают статическую и динамическую прочность сварных соединений.

**Основными методами борьбы с порами, вызванными водородом при качественном исходном материале, является:**

- тщательная подготовка сварочных материалов: прокалка флюса, применение защитного газа гарантированного качества, вакуумная дегазация и зачистка перед сваркой сварочной проволоки и свариваемых кромок (удаление альфинированного слоя травлением и механической обработкой, снятие адсорбированного слоя перед сваркой щётками или обезжириванием),
- соблюдение защиты и технологии сварки.

Высокий коэффициент поверхностного натяжения титана в сочетании с малой вязкостью в расплавленном состоянии увеличивает опасность прожогов и вызывает необходимость более тщательной сборки деталей под сварку по сравнению с аналогичными деталями из сталей.

## Особенности сборки титановых сплавов:

- 1) Так как высокий коэффициент поверхностного натяжения и жидкотекучести необходимо высокое качество сборки;
- 2) Недопустимы правка и подгонка деталей и использование местного нагрева газовым пламенем;
- 3) Правка и подгонка в холодном состоянии затруднена, в связи с значительным пружинением титана;
- 4) Необходима надежная защита шва от воздействия с обратной стороны шва, даже при выполнении прихваток;

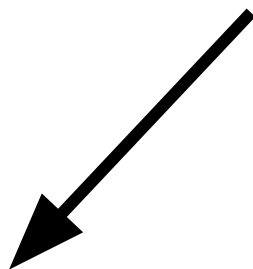
# Характеристика свариваемости ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Марка	Свариваемость	Технологические особенности сварки
BT1-00, BT1-0 OT4-0, OT4-1	Хорошая	Зачистка кромок Режим с минимальной погонной энергией
OT4, BT5, BT5-1	Удовлетворительная	
BT6, BT3-1, BT9 BT14, BT16, BT20	Ограниченная	Мягкий режим с малыми скоростями охлаждения
BT22		Последующая термообработка
PT-7M, PT-3B, PT-1M	Хорошая	Режим с высокой скоростью охлаждения

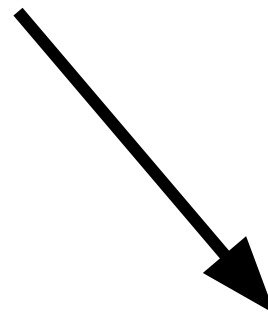
# Дуговая сварка ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В среде защитных газов



**В среде инертного газа**



Неплавящимся  
электродом



Плавящимся  
электродом

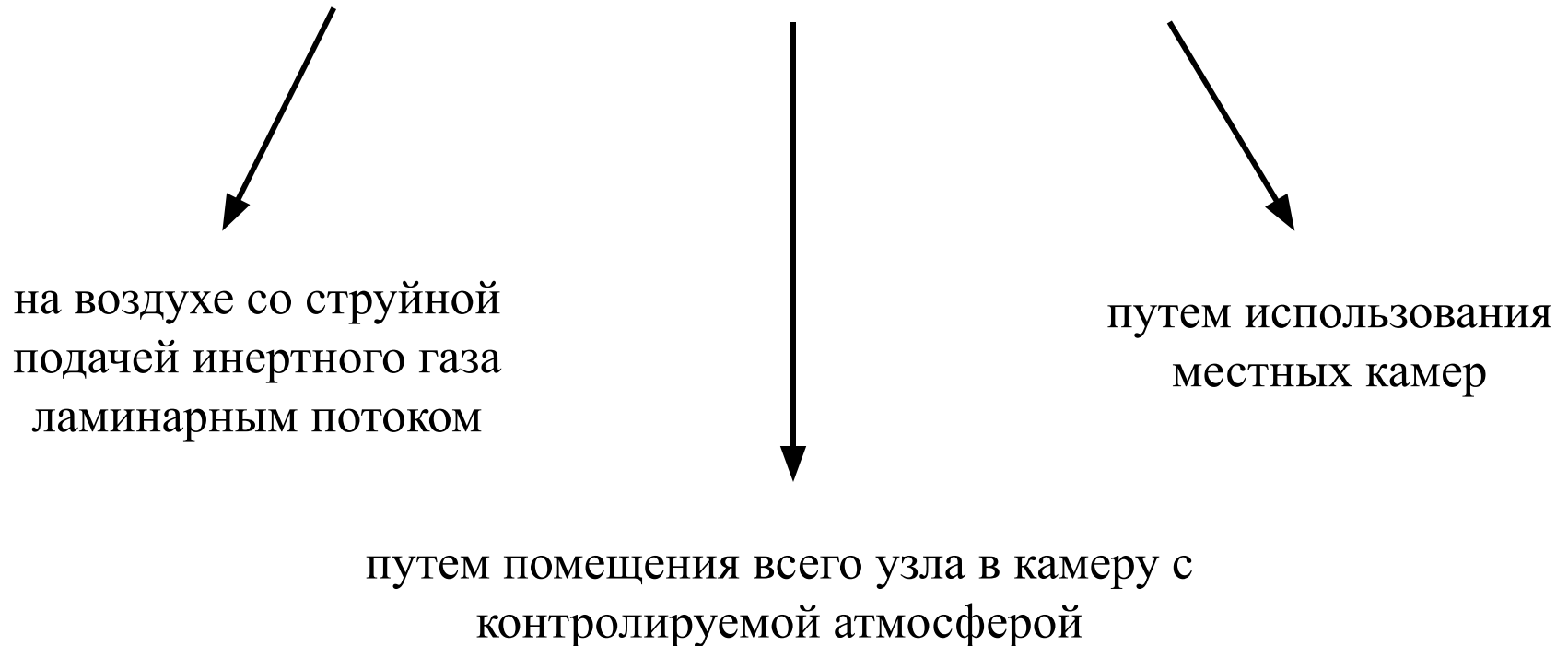
Для защиты зоны сварки используют аргон высшего сорта по ГОСТ 10157-79 и гелий высокой чистоты по ГОСТ 20461-75 или смеси этих газов.

Гелий и его смеси с аргонem целесообразно использовать при дуговой сварке плавящимся электродом больших толщин

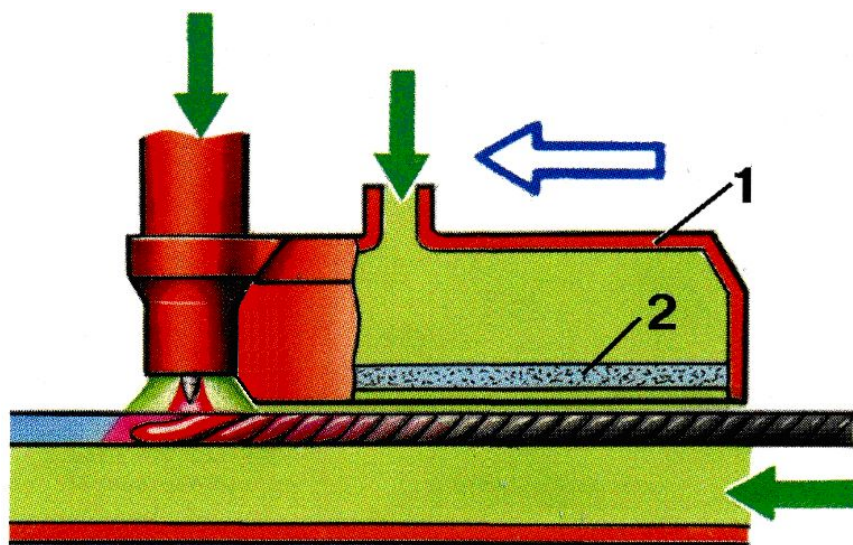


# Аргонодуговая сварка титановых сплавов неплавящимся вольфрамовым электродом

## Способы защиты зоны сварки при сварке титана и его сплавов



Защита на воздухе со  
струйной подачей инертного  
газа ламинарным потоком



1- дополнительная насадка  
2- газовая линза

Защита путем  
использования местных  
камер



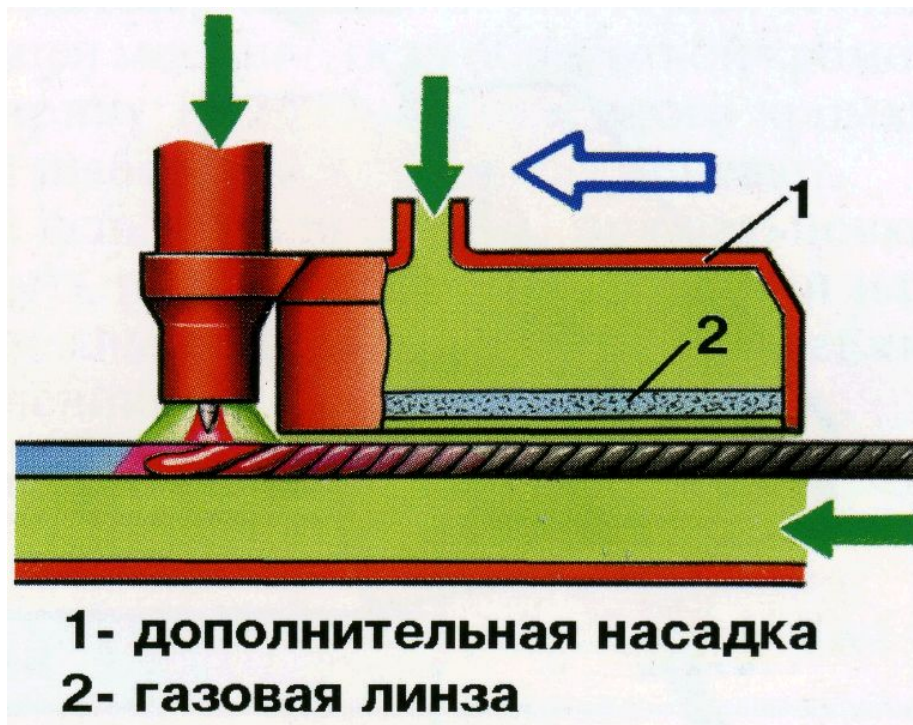
**Наиболее надежную защиту обеспечивают камеры с контролируемой атмосферой и их применяют для изделий ответственного назначения.**

**Наибольшее распространение получила сварка вольфрамовым электродом на воздухе со струйной подачей инертного газа.**

## Сварка титана на воздухе со струйной подачей инертного газа ламинарным потоком

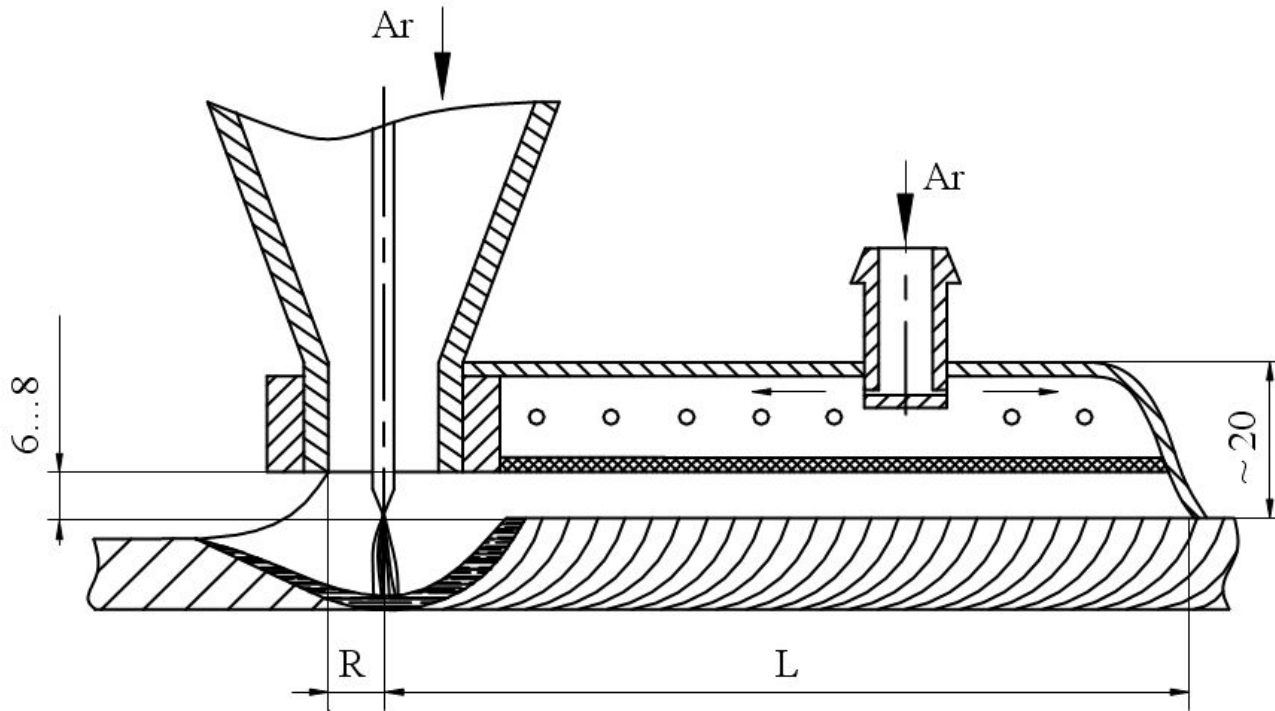
На горелке закрепляют специальную насадку, размеры которой назначаются такими, чтобы защитить от воздуха требуемую изотерму на основном металле.

Для предотвращения окисления металла сварного соединения защищают изотермы в  $350 \dots 400 \text{ }^\circ\text{C}$ . Размеры изотермы обычно определяют расчетным путем по формулам распространения теплоты в металлах при сварке.



Длина и ширина насадки должны соответствовать размерам изотермы.

Газозащитная насадка должна защищать металл участка нагретого до температуры равной 350–400 град. С с лицевой и обратной стороны шва.



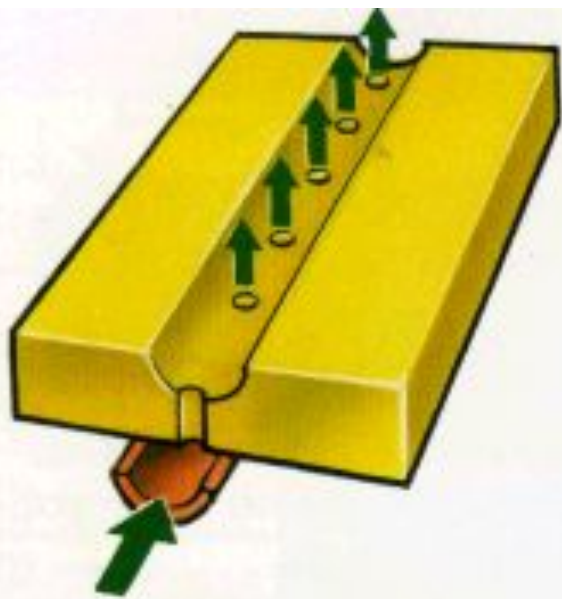
$$R = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot (T - T_0)}$$

$$L = t \cdot V - R$$

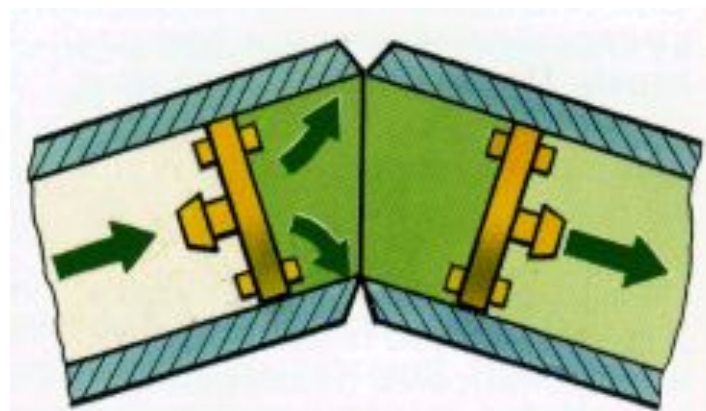
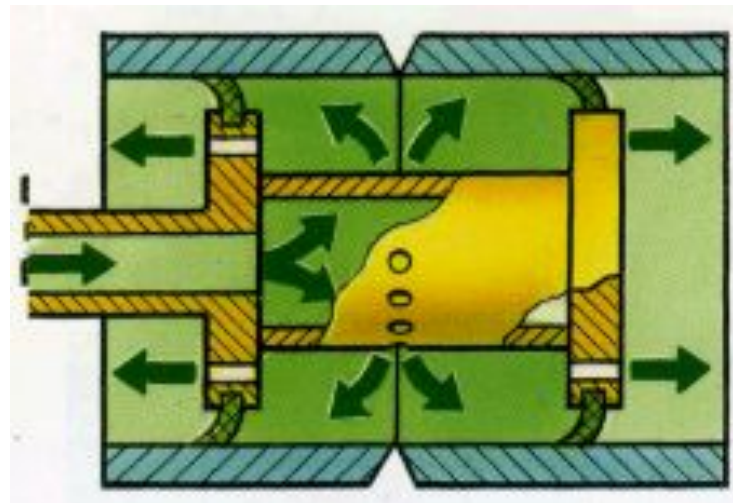
$q$  – эффективная тепловая мощность;  $T - T_0 = 350 - 400$  град.

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $t$  – время охлаждения металла до 400 град. С

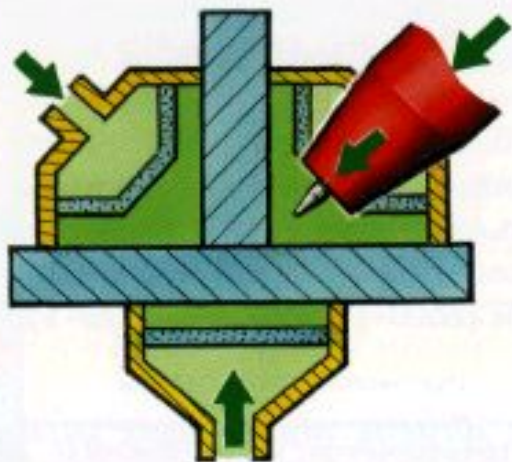
Для защиты обратной стороны шва используют специальные подкладки и насадки.



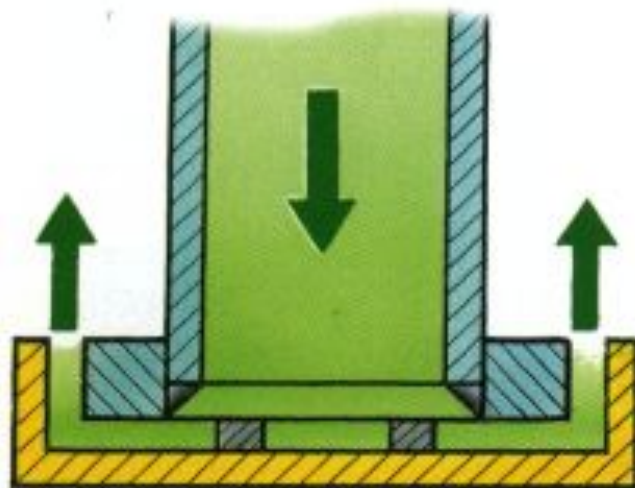
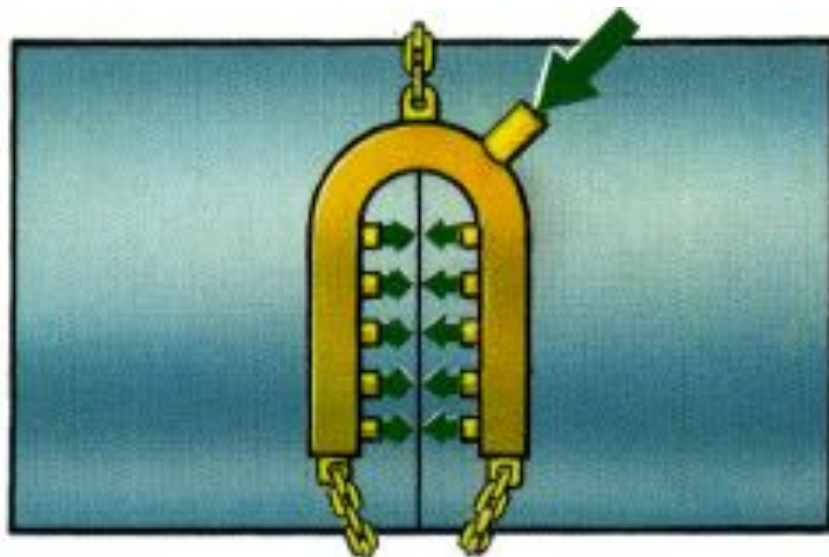
Специальная подкладка для защиты корня шва, нагретого до 250-300 °С



Защита при сварке секционных отводов



**Защитные приспособления из нержавеющей стали для тавровых и угловых соединений**



**Защита при приварке фланца**

Приблизительно о надежности газовой защиты можно судить по внешнему виду сварного соединения.

Блестящая серебристая поверхность шва свидетельствует о хорошей защите и удовлетворительных свойствах шва.  
Желто-голубой цвет, серые налеты указывают на плохую защиту.



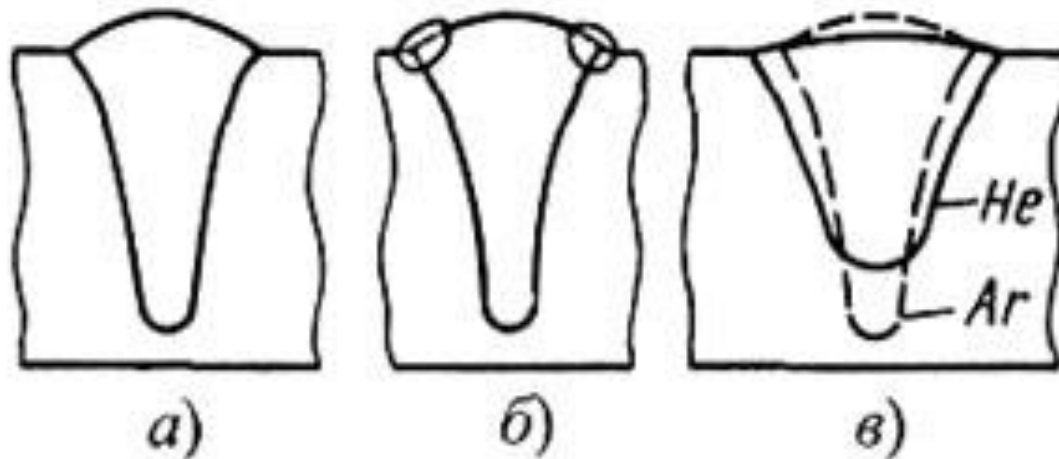
**Режимы аргодуговой сварки вольфрамовым электродом, рекомендуемые для  
ЛИСТОВ ТИТАНА**

Толщина свариваемого металла, мм	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Диаметр сварочной проволоки, мм	Сварочный ток, А	Напряжение на дуге, В	Расход аргона, л/мин		Диаметр сопла горелки, мм	Кол-во проходов
					Для защиты дуги	Для защиты обратной стороны		
0,5-1,0	1,5-2,0	1,0-1,5	25-60	8-10	15-20	10-15	14-16	1
1,6	1,5-2,0	1,5-2,0	60-80	10-12	15-20	10-15	14-16	1
2,0	2,0-2,5	1,5-2,0	80-100	10-14	15-20	10-15	14-16	1
3,0	2,5-3,0	1,5-3,0	120-160	10-14	15-20	10-15	16-18	1
4,0	2,5-3,0	1,5-3,0	120-160	10-16	15-20	10-15	18-20	2
6,0	2,5-3,0	1,5-3,0	140-180	10-16	15-20	10-15	18-20	3-4
8,0-10,0	2,5-3,0	2,0-3,0	160-180	10-16	16-20	10-15	18-20	8-10
12,0	3,0-4,0	2,0-4,0	180-220	10-16	16-20	10-15	18-20	12
14,0	3,0-4,0	3,0-4,0	200-220	10-16	20-30	8-12	18-20	14
16,0	3,0-4,0	3,0-4,0	200-240	10-16	20-30	8-12	18-20	16
18-20	4,0-5,0	3,0-4,0	200-300	10-16	20-30	8-12	18-20	20
20-26	4,0-5,0	4,0-5,0	250-300	10-16	20-30	8-12	18-20	24
26-30	4,0-5,0	4,0-5,0	250-300	10-16	20-30	8-12	18-20	26

Рабочая часть вольфрамового электрода  
затачивается на конус под углом  $30 \dots 45^\circ$ .

Конус притупляют до диаметра  $0,5 \dots 0,8$  мм.

Это способствует расфокусировке дуги и более  
плавному переходу от основного металла к металлу  
шва (рис. 79) при сварке в аргоне, иначе  
необходимо наложение галтельных швов.



Ручная сварка вольфрамовым электродом ведется без колебательных движений горелки углом вперед на короткой дуге.

При обрыве дуги и после окончания сварки аргон должен подаваться до тех пор, пока металл не охладится ниже 400 °С.

В качестве присадки применяют проволоки:  
ВТ1-00, ВТ2 - для  $\alpha$ - и псевдо-  $\alpha$  -сплавов,  
СПТ-2 - для  $(\alpha + \beta)$ -сплавов и др.

Для повышения эффективности использования теплоты при сварке вольфрамовым электродом разработаны разновидности способа: импульсно-дуговая сварка, погруженной дугой, сквозным проплавлением, по флюсу, с присадочной порошковой проволокой, с магнитным перемешиванием сварочной ванны, в щелевую разделку и др.

## Сварка плавящимся электродом

применяется для различных типов соединений из титана и его сплавов при толщинах более 3 ... 4 мм в нижнем положении. Сварка ведется на постоянном токе обратной полярности.

Для сварки титана производят модернизацию существующего оборудования для сталей (автоматы типа АДС), уделяя особое внимание повышению скорости подачи сварочной проволоки и обеспечению полноценной защиты металла при сварке. Источники питания применяют с жесткой характеристикой.

С целью повышения эффективности сварки плавящимся электродом в среде инертных газов применяют предварительный подогрев сварочной проволоки проходящим током и импульсно-дуговую сварку.

Полуавтоматическая импульсно-дуговая сварка титановых сплавов обеспечивает повышение производительности сварочных работ в 2 ... 3 раза при снижении погонной энергии сварки в 2 ... 2,5 раза.



При дуговой сварке механические свойства металла сварного шва и прочность соединения в целом зависят от марки титана, марки присадочной проволоки, способов и режимов сварки и могут быть доведены до показателей основного металла.