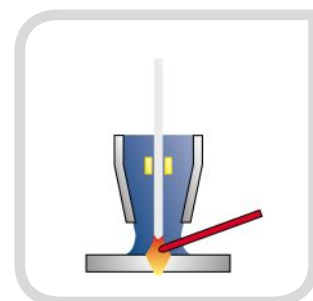




# СПРАВОЧНОЕ РУКОВОДСТВО ПО СВАРКЕ ВИГ



## Оглавление

1	Предисловие .....	2
2	Метод сварки .....	2
2.1	Общие сведения .....	2
2.2	Вид тока .....	3
2.3	Электроды .....	3
2.4	Защитные газы .....	4
3	Разделка свариваемых кромок .....	5
3.1	Формы кромок .....	5
3.2	Разделка кромок под сварку .....	5
3.3	Подкладка .....	5
3.4	Формовка .....	5
4	Сварочная горелка .....	6
4.1	Охлаждение .....	6
4.2	Конструкция горелки .....	7
4.3	Конструкция электрода .....	7
5	Сварочные аппараты .....	7
5.1	Устройство управления .....	7
5.2	Источники тока .....	9
6	Выполнение сварки .....	11
6.1	Выбор присадки для сварки .....	11
6.2	Настройка расхода защитного газа .....	11
6.3	Очистка поверхности изделия .....	12
6.4	Зажигание электрической дуги .....	12
6.5	Ведение горелки .....	13
6.6	Эффект магнитного выдувания дуги .....	13
6.7	Положения сварного шва .....	14
6.8	Параметры сварки .....	14
6.9	Сварка импульсами тока .....	16
6.10	Возможности механизирования процесса сварки .....	16
6.11	Техника безопасности .....	17
7	Особенности различных материалов .....	17
7.1	Нелегированная и низколегированная сталь .....	18
7.2	Аустенитные хромоникелевые стали .....	18
7.3	Алюминий и алюминиевые сплавы .....	18
7.4	Медь и медные сплавы .....	20
7.5	Другие материалы .....	20
8	Применения сварки ВИГ .....	21
8.1	Отрасли производства .....	21
8.2	Примеры применения .....	21
9	Литература .....	23
10	Публикации .....	23

## 1 Предисловие

Сварка ВИГ (Рис. 1) – полное название согласно DIN 1910, части 4, дуговая сварка вольфрамовым электродом в среде инертного газа – была впервые применена в США и в 1936 году стала известна как аргоно-дуговая сварка. В Германии ее начали применять только после Второй мировой войны. В англоговорящих странах этот процесс называется сваркой TIG (от англ. «Tungsten» - «вольфрам, вольфрамовый»). Сварка ВИГ по сравнению с другими методами сварки плавлением отличается рядом преимуществ. Во-первых, ее универсальное применение. Если металл вообще пригоден к сварке плавлением, то его можно сварить посредством данного процесса. Во-вторых, это очень „чистый“ процесс, который не приводит к образованию брызг и отличается малой степенью вредности. При правильном применении он гарантирует высококачественное сварное соединение.

Особым достоинством сварки ВИГ является то, что в ней, по сравнению с другими сварочными процессами, используются плавящийся электрод, разъединяются внесение присадки для сварки и сила тока. Поэтому сварщик может оптимально настроить ток на сварочное задание и внести необходимое количество присадки для сварки для выполнения сварочного задания. Это делает процесс



Рис. 1 TRITON 260 DC, Сварка ВИГ, охлаждающий змеевик

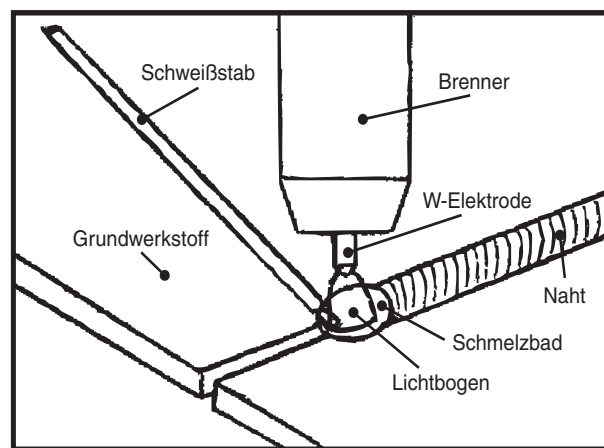


Рис. 2 Принцип сварки ВИГ

особенно пригодным для сварки корня шва и при сварке в стесненных условиях. Благодаря названным выше преимуществам сегодня сварка ВИГ эффективно применяется во многих отраслях промышленности и ремеслах. Разумеется, при ручном применении такая сварка требует хорошей подготовки и умения сварщика. Данная брошюра призвана разъяснить особенности процесса сварки ВИГ, а также возможно пробудить к ней интерес фирм, которые еще не применяют сварку ВИГ, хотя имеют дело со сварочными заданиями, для которых предназначен данный метод сварки.

## 2 Метод сварки

### 2.1 Общие сведения

Сварка ВИГ относится к сваркам в защитном газе с нерасходуемым электродом (процесс №14). ISO 857-1 даёт следующее объяснение метода в переводе с англ.:

«Дуговая сварка в защитном газе с использованием нерасходуемого электрода из чистого или легированного вольфрама, при котором электрическая дуга и расплав защищены оболочкой инертного газа»

При дуговой сварке вольфрамовым электродом в среде инертного газа (процесс №141) электрическая дуга горит свободно, при плазменной же сварке электрической дугой (процесс № 15), которая также относится к сваркам в защитном газе с нерасходуемым электродом, дуга сжата, как показано на схеме процесса Рис. 2.

Диаметр электрода [мм]	Постоянный ток [A]				Переменный ток [A]	
	Отрицательный электрод		Положительный электрод		Чистый вольфрам	Вольфрам с оксидом
	Чистый вольфрам	Вольфрам с оксидом	Чистый вольфрам	Вольфрам с оксидом		
1,6	40-130	60-150	10-20	10-20	45-90	60-125
2,0	75-180	100-200	15-25	15-25	65-125	85-160
2,5	130-230	170-250	17-30	17-30	80-140	120-210
3,2	160-310	225-330	20-35	20-35	150-190	150-250
4,0	275-450	350-480	35-50	35-50	180-260	240-350
5,0	400-625	500-675	50-70	50-70	240-350	330-460

**Таблица 1: Рекомендуемые диапазоны силы тока для вольфрамовых электродов согласно DIN EN 26848**

Данный процесс получил свое название от вида электрода (вольфрамового) и используемого защитного газа (инертного). При правильном применении электрод не плавится из-за высокой точки плавления вольфрама (3380°C). Он только носитель электрической дуги. Присадка для сварки вводится вручную в форме присадочных прутков, а при полностью механизированной сварке вводится в виде проволоки механизмом подачи. Защитный газ concentрично обтекает электрод, выходя из сопла защитного газа, и защищает его и металл шва от воздействия атмосферы.

## 2.2 Вид тока

Как правило, для сварки ВИГ применяется постоянный ток. При сварке стали и других металлов и сплавов на электроде находится холодный отрицательный полюс, а на изделии – горячий положительный полюс. Токонгрузочная способность и стойкость электрода при такой полярности значительно выше, чем при сварке на положительном полюсе. Переменный ток применяют для сварки алюминия и его сплавов, а также некоторых сортов бронзы, то есть материалов, которые образуют тугоплавкие оксиды или очень вязкие расплавы оксидов. Об этом пойдет речь далее. При сварке переменным током токонгрузочная способность ниже, чем при сварке постоянным током на отрицательном полюсе – см. также Таблица 1.

Также имеются различия в характеристике провара. Он лучше всего при сварке постоянным током на отрицательном полюсе.

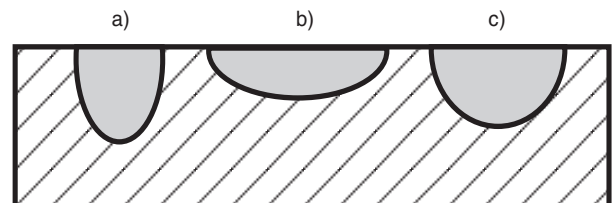
При сварке переменным током провар из-за более тупой формы электрода более плоский и широкий, а при сварке на положительном полюсе из-за низкой токонгрузочной способности - наименьший,

Рис. 3.

## 2.3 Electrodes

Вольфрамовые электроды из-за высокой точки плавления не могут изготавливаться литьем. Поэтому они изготавливаются методом порошковой металлургии путем спекания с последующим сжатием и упрочнением. Стандартные диаметры электродов согласно DIN EN 26848 (ISO 6848) составляют 0,5-10 мм. Чаще всего применяют электроды диаметром 1,6; 2,0; 2,5; 3,2 и 4,0 мм. Стандартная длина электрода – 50, 75, 150 и 175 мм. Длина также зависит от конструкции горелки.

Наряду с электродами из чистого вольфрама имеются такие, к которым перед спеканием добавляется 0,5-4 % оксида тория, циркония, лантана или церия. При применении чистых вольфрамовых электродов образуется очень спокойная дуга, но оксидосодержащие электроды имеют следующее преимущество. При эксплуатации они меньше нагреваются, так как работа выхода электронов из заключенного в электродах оксида значительно меньше, чем из чистого вольфрама. Зажигаемость дуги, токонгрузочная способность и стойкость лучше у оксидосодержащих электродов. Таблица 1 содержит для сравнения рекомендованные диапазоны силы тока для чистых вольфрамовых электродов и электродов с примесью оксидов на обоих полюсах постоянного тока и при переменном токе согласно DIN EN 26848. Благодаря примеси оксида возрастает токонгрузочная



**Рис. 3:**  
**Провар при различных видах тока**  
**a) постоянный ток (отрицательный полюс)**  
**b) постоянный ток (положительный полюс)**  
**c) переменный ток**

Условные обозначения	Химический состав				Распознавательная окраска	
	Содержание оксида		Примеси	Вольфрам		
	% (м/м)	Вид				% (м/м)
WP	-	-	≤ 0,20	99,8	зелёная	
WT 4	от 0,35 до 0,55	ThO <sub>2</sub>		другие		синяя
WT 10	от 0,80 до 1,20					желтая
WT 20	от 1,70 до 2,20					красная
WT 30	от 2,80 до 3,20					фиолетовая
WT 40	от 3,80 до 4,20					оранжевая
WZ 3	от 0,15 до 0,50	ZrO <sub>2</sub>				коричневая
WZ 8	от 0,70 до 0,90					белая
WL 10	от 0,90 до 1,20	LaO <sub>2</sub>				черная
WC 20	от 1,80 до 2,20	CeO <sub>2</sub>				серая

**Таблица 2 Вольфрамовые электроды согласно DIN EN 26848**

способность.

Ранее применялись вольфрамовые электроды с содержанием примерно 2% оксида тория. Но их применение в настоящее время снижается. Торий является альфа-излучателем, поэтому содержащие оксид тория электроды испускают слабое радиоактивное излучение. Оно не опасно для сварщика, однако увеличивает общую лучевую нагрузку. Намного опаснее, когда вдыхается шлифовальная пыль, образующаяся при заточивании электрода. Поэтому сегодня намного чаще применяют вольфрамовые электроды, содержащие «благоприятный для дуговой сварки» оксид лантана или церия.

Распознать электрод можно по условному обозначению и распознавательной окраске, которые установлены стандартом Таблица 2.

## 2.4 Защитные газы

Как следует из названия процесса, для сварки ВИГ, как правило, применяются инертные газы. Защитные газы нормированы стандартом DIN EN 439. Согласно данному стандарту они имеют обозначения I1, I2 и I3. Наиболее часто при сварке ВИГ в качестве защитного газа применяется аргон (I1). Степень его чистоты должна составлять минимум 99,95%. Для металлов, имеющих очень хорошую теплопроводимость, таких как, алюминий или медь, также используется гелий (I2). При использовании гелия в качестве защитного газа электрическая дуга имеет более высокую температуру. Но, в первую очередь, происходит

более равномерное распределение температуры между ядром и краем электрической дуги. Чистый гелий редко применяется при сварке ВИГ, за исключением особых случаев. Уже сравнительно давно применяется смесь аргона и гелия (I3) с содержанием гелия 25, 50 или 75%. Благодаря этому удается снизить температуру предварительного нагрева, например, толстых алюминиевых структур, для достижения достаточного провара. Более того, можно повысить скорость сварки.

При сварке ВИГ нержавеющей хромоникелевой стали для этой цели применяется смесь аргона и водорода (R1), при этом содержание водорода во избежание образования пор должно составлять не более 5%.

Расход защитного газа определяется диаметром газового сопла газа и окружающего воздушного потока. Ориентировочным значением для аргона может быть объемный расход 5-10 л/мин. На ветру или сквозняке Рис. 4 при определенных условиях необходим больший расход. При использовании смеси аргона и гелия из-за низкой плотности гелия необходим более высокий расход.



**Рис. 4 Сварка ВИГ поручня**

## 3 Разделка свариваемых кромок

### 3.1 Формы кромок

Наиболее важные формы кромок, применяемых при сварке ВИГ, изображены на Рис. 5.

Тонкие листы можно соединять с одной или с двух сторон бескосным стыковым швом. Если толщина листа настолько велика, что невозможно произвести проплавление с обеих сторон, необходимо скосить бока кромок. Угол разделки кромок соответствующего V-образного стыка в большинстве случаев равняется  $60^\circ$ , для алюминия –  $70^\circ$ . Для предотвращения проплавления край листа в области корня шва часто слегка притупляется. При выраженном притуплении речь уже идет не о V-образной, а об Y-образной кромке. Сталь можно сваривать в один слой только при толщине до 6 мм. При большей толщине необходима многослойная сварка.

Для тонких листов применяет также соединение внахлестку. Совершенно иначе для сварки ВИГ применяют соединение с отбортовкой кромок. Отогнутые вверх края листа расплавляются под дугой без присадки для сварки и в таком способе соединяются. При угловом соединении с одной или обеих соединяемых сторон снимают фаски.

### 3.2 Разделка кромок под сварку

Подготовка боков кромок нелегированной и низколегированной стали чаще всего производится путем газовой резки. Для высоколегированной стали, алюминия и металлических сплавов применяется плазменная, лазерная или электронно-лучевая резка. Тонкие листы часто разрезаются путем

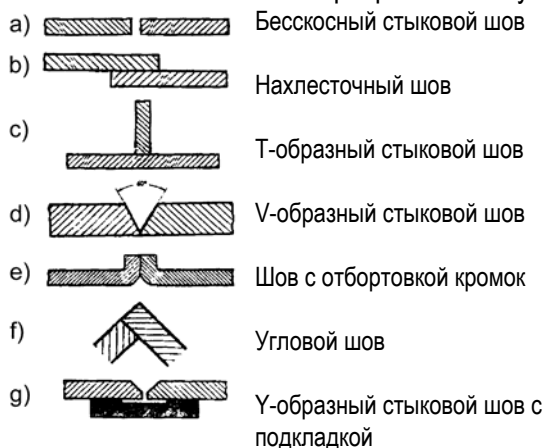


Рис. 5 Наиболее важные формы кромок при сварке ВИГ

механической резки (ножницами), в то время как кромки более толстых материалов проходят еще и механическую обработку (точение, строгание).

### 3.3 Подкладка

При ручной сварке сварщик наблюдает за протеканием сварки и путем настройки правильной силы тока, положения электрической дуги в кромке, скорости сварки и количества вносимой присадки для сварки получает равномерный валик, наплавленный в корне шва, даже при неодинаковом зазоре в корне шва. В то же время при полностью механизированной сварке необходимо, чтобы соответствовало все – от зазора в корне шва, правильно настроенных параметров сварки до количества непрерывно вносимой присадки для сварки.

Поэтому для облегчения заварки корня при механической сварке часто используется подкладка, см. Рис. 5. Такие подкладки есть практически для всех металлов и сплавов. Они изготавливаются из меди. Для алюминия, который имеет низкую точку плавления - из нержавеющей стали. Используются также керамические подкладки. Подкладка предотвращает вытекание металла шва в местах с более широким зазором. Таким образом металл задерживается, и образуется валик, наплавленный в корне шва. Подкладка также придает форму нижней стороне корня шва. Для этой цели в ней часто предусмотрен желобок.

### 3.4 Формовка

Под формовкой понимают дополнительную подачу защитного газа на обратную сторону шва, где свариваемый материал тоже находится в жидком состоянии, но до него не доходит защитный газ, подающийся на верхнюю сторону. Особенно при сварке ВИГ с ее относительно низкой скоростью сварки обратная сторона шва из-за окисления часто выглядит «пережженной». Это явление устраняется с помощью формовочного газа. Холодный защитный газ способствует формованию обратной стороны шва. Отсюда он и получил свое название «формовочный газ».



**Рис. 6** Сварочные работы ВИГ в химической промышленности

Путем формовки удается предотвратить или уменьшить образование оксидной пленки и цвета побежалости на обратной стороне шва. Это важно, например, при сварке нержавеющей стали, поскольку оксидная пленка снижает устойчивость к коррозии сварного соединения, Рис. 6.

При сварке труб можно просто заглушить их и ввести внутрь формовочный газ. При сварке листов он может подаваться из отверстий пластины подкладки. В качестве формовочного газа может использоваться смесь аргона и водорода. Стандартом DIN EN 439 (группа F) нормируются недорогие формовочные газы. Они состоят, например, из смеси водорода и азота. При определенных условиях для формования может также использоваться чистый азот.

## 4 Сварочная горелка

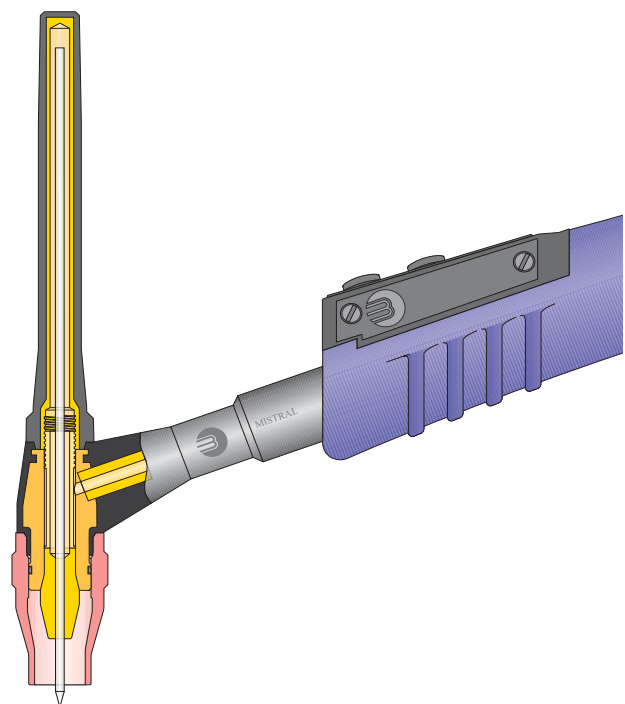
Сварочная горелка является инструментом для сварки ВИГ. Ее функции особенно влияют на сварной шов. На Рис. 7 показана сварочная горелка ВИГ с газовым охлаждением.

Горелка соединена со сварочным аппаратом пакетом шлангов. С помощью пакета шлангов протягиваются сварочный кабель, шланг подачи защитного газа, а также кабель управления, благодаря которому нажатием кнопок на пульте управления горелки можно включать и выключать различные функции.

### 4.1 Охлаждение

Для горелок, которые рассчитаны на силу тока около 150 А, достаточно охлаждения протекающим защитным газом и окружающим воздухом. Горелки более высокой мощности имеют водяное охлаждение. В этом случае при помощи пакета шлангов протягиваются шланги для подвода и отвода воды, причем сварочный кабель охлаждается отводимой водой. Благодаря этому можно обойтись небольшим поперечным сечением, за счет чего пакет шлангов остается гибким. Для этой цели в пакете шлангов имеется комбинированный токо-водопроводный кабель. Датчик напора, который чаще всего устанавливается на сварочном аппарате, контролирует, чтобы при недостаточной или отсутствующей подаче охлаждающей воды отключался сварочный ток.

Поскольку вода относительно дорога, то для охлаждения используют преимущественно аппараты с обратным водяным охлаждением и закрытым контуром охлаждения.



**Рис. 7** Сварочная горелка ВИГ с газовым охлаждением

## 4.2 Конструкция горелки

Вольфрамовый электрод находится на зажимной втулке и фиксируется путем затягивания головки горелки. Длина головки горелки выбирается в зависимости от цели применения. При сварке в узком месте она может быть значительно короче, чем показанная на рис. Рис. 8.

Важную функцию выполняет пульт управления горелки. Он может быть в форме одной или двух кнопок или иметь форму тумблера, который переключается вперед и назад. При нажатии на кнопки включается и выключается сварочный ток, а также регулируется ток во время сварки. При этом можно настроить скорость изменения тока.

Диаметр вольфрамового электрода зависит от применяемой силы тока, вида тока (постоянный/переменный) и полярности. При выборе диаметра могут быть полезными приведенные на Таблица 1 диапазоны изменения силы тока.

На нижнем конце сварочной горелки находится газовое сопло. Оно может быть металлическим или керамическим. Диаметр газового сопла должен соответствовать сварочному заданию. Если необходимо защитить большую сварочную ванну, то газовое сопло тоже должно быть большим. Поэтому указывается отношение к силе тока или к диаметру электрода. Вольфрамовый электрод выступает над газовым соплом в зависимости от его диаметра на 2 мм при тонких электродах или до 3 мм при более толстых электродах.

## 4.3 Конструкция электрода

При сварке постоянным током (отрицательный полюс) вольфрамовый электрод обычно конусообразно заостряется. Это достигается, как правило, шлифовкой. Шлифовку необходимо выполнять таким образом, чтобы на отшлифованном конце шлифовальные царапины располагались только в продольном направлении. Тогда электрическая дуга будет

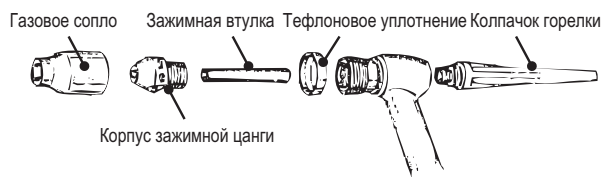


Рис. 8 Диаграмма горения сварочной горелки ВИГ

спокойнее, чем при поперечных царапинах. Угол заострения рассчитывается из отношения диаметра электрода к длине конца электрода. Это соотношение должно приблизительно равняться 2,5.

При правильно настроенной силе тока расплавляется только малая часть конца электрода, и там образуется маленький шарик. При этом дуга зажигается особенно спокойно. Поэтому рекомендуется приплавить этот шарик еще перед началом сварки путем кратковременной перегрузки. В современных аппаратах есть возможность выбрать такую функцию на устройстве управления.

При сварке переменным током термическая нагрузка вольфрамового электрода значительно выше, чем при сварке постоянным током (отрицательный полюс). Поэтому при таком виде тока электрод либо совсем не заостряется, либо заостряется в форме усеченного конуса, с соотношением обоих диаметров 2:1.

При сварке постоянным током (положительный полюс), что применяется крайне редко, электрод не затачивается.

Необходимо обратить внимание, что форма конца электрода значительно влияет на характеристику провара. При использовании острых электродов провар узкий и глубокий, а при использовании притупленных электродов при тех же условиях – более плоский и широкий, Рис. 9.

## 5 Сварочные аппараты

Сварочные аппараты ВИГ состоят из источника тока и устройства управления.

### 5.1 Устройство управления

Устройство управления включает, регулирует и сохраняет постоянный сварочный ток. Кроме того, оно имеет дополнительные функции, которые делают возможной сварку или облегчают ее, Рис. 10.

При выключении в конце сварочного шва у современных аппаратов может временно снижаться ток для заполнения точки (спад тока). Также ток может ступенчато повышаться в начале сварки (нарастание тока). Эти функции можно запустить в 2-х- или 4-х- тактом режиме с пульта управления горелки. Таким образом, получается сварочная



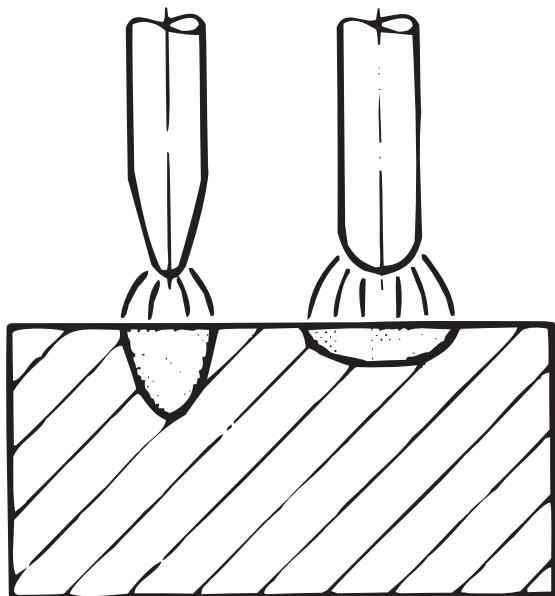


Рис. 9 Провар при различных формах конца электрода

программа, которая схематически изображена на Рис. 11.

У современных аппаратов настроенное время спада и нарастания остается постоянным, независимо от настроенной величины тока. Можно также настроить время подачи защитного газа до и после сварки.

В устройство управления встроен узел зажигания. Дуга ВИГ может зажигаться контактом между электродом и изделием, однако при этом существует опасность повреждения конца электрода, после чего дуга будет гореть неспокойно. Кроме того, в сварочный шов может перенестись вольфрам, который из-за высокой точки плавления не расплавится и останется в шве инородным телом. Поэтому при применении простых аппаратов, не имеющих устройств для бесконтактного зажигания, зажигание производится за пределами шва на заходной планке или на лежащем рядом медном листе.

Существуют разные способы выполнить зажигание без повреждения электрода. При зажигании импульсами высокого напряжения, которое иногда еще называют высокочастотным зажиганием, между электродом и изделием прикладывается переменное напряжение величиной в несколько тысяч вольт (например, 6-8 кВ). С пульта управления горелки можно задать, чтобы очень короткие импульсы напряжения (например, 0,5-1 мкс) в форме искрового промежутка переходили от электрода к

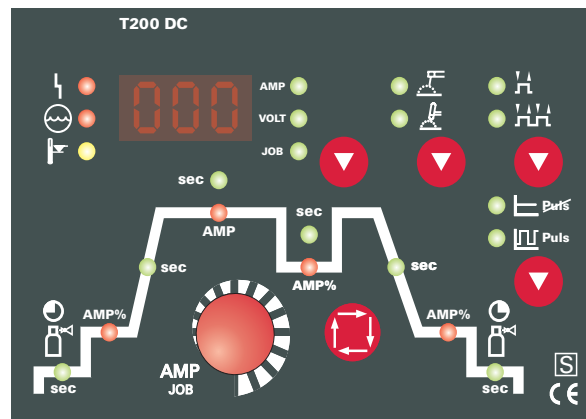


Рис. 10 Устройство управления инверторного источника тока EWM для сварки ВИГ TRITON 220 DC PowerSinus

изделию с частотой 100 Гц при сварке постоянным током, при переменном токе – с частотой 50 Гц, а при использовании современных аппаратов – с настроенной частотой сварочного тока. Искровой промежуток можно слышать и видеть. Он ионизирует молекулы газа в пространстве между электродом и изделием, и при приближении конца электрода на несколько миллиметров к месту зажигания дуга бесконтактно зажигается. Эмпирическое правило гласит, что зажигание возможно на расстоянии в 1 мм на каждые 1000 В напряжения зажигания. Во избежание неумышленного контакта между электродом и изделием лучше всего установить горелку наискось на край газового сопла, как показано на Рис. 13, и, выравнивая горелку, приближать конец электрода, пока не загорится дуга.

Только после этого газовое сопло снимается с изделия и принимается нормальное положение горелки. При сварке с синусоидальным переменным током, чтобы снова зажечь дугу после прохождения тока и напряжения через нуль, нужно воспользоваться приспособлением

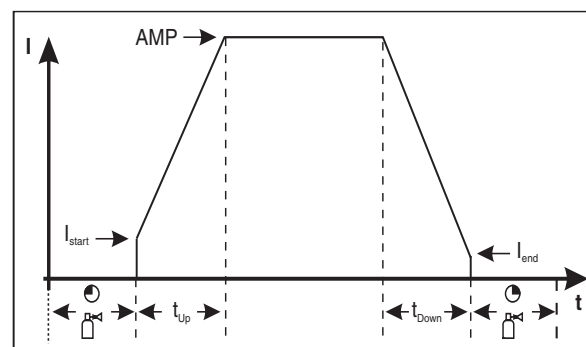


Рис. 11 Циклограмма в начале и конце сварки

для зажигания.

Второй возможностью является так называемое зажигание "Lift-Arc". Это контактное зажигание, при котором не повреждается электрод, поскольку при контакте протекает очень низкий ток. Только когда после подъема электрода зажигается слабая дуга, подключается настроенный в устройстве управления сварочный ток.

К другим функциям устройства управления относятся переключение из нормального режима в импульсный режим и, в случае необходимости, на другой метод сварки, при этом, при необходимости, можно также изменить характеристику.

## 5.2 Источники тока

Источник тока преобразует сетевой переменный ток с высоким напряжением и низкой силой тока в сварочный ток с высокой силой тока и низким напряжением и, при необходимости, выпрямляет ток. Для сварки ВИГ используется как переменный, так и постоянный ток.

Наиболее простым и дешевым источником сварочного тока является сварочный трансформатор. Он состоит из первичной катушки с множеством тонких намоток и вторичной катушки с несколькими толстыми намотками. Сетевой ток повышает или понижает сетевое напряжение в зависимости от числа намоток этих катушек. Сварочный трансформатор обычно имеет спадающую статическую характеристику. Различная сила сварочного тока настраивается при помощи регулировки магнитным шунтом, трансдуктора или отвода в первичной обмотке.

Сварочный выпрямитель состоит из трансформатора с присоединенным выпрямительным агрегатом, Рис. 12.

В качестве выпрямителя сегодня используются кремниевые диоды или тиристоры. Переменный ток, предварительно

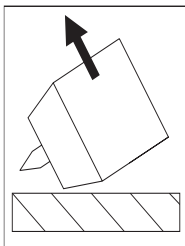


Рис. 13 Зажигание импульсами высокого

преобразованный трансформатором на необходимую силу тока и напряжение, преобразуется ими в постоянный ток. В простейших сварочных выпрямителях используется однофазное подключение (двухполупериодная схема). Они дают сварочный ток с достаточным коэффициентом пульсации. Улучшение выравнивания тока достигается при преобразовании и выпрямлении всех 3 фаз переменного тока (шестиимпульсная мостовая схема). Простые выпрямители предлагаются также в качестве так называемых комбинированных устройств, которые могут переключаться на подачу постоянного или переменного сварочного тока. Сварочные выпрямители для сварки ВИГ имеют спадающую статическую характеристику. Ее можно настроить при помощи регулировки магнитным шунтом, трансдуктора или отвода в первичной обмотке в цепи переменного тока или импульсно-фазовым регулятором тиристора.

Современные аппараты для сварки ВИГ (Рис. 15) в качестве источника тока оснащены инвертором.

Инвертор является электрическим источником тока, который работает по совершенно другому принципу действия, чем традиционные источники тока (Рис. 16).

Ток, идущий из сети, сначала выпрямляется, в процессе чего он становится преобразуемым, после этого путем включения и выключения он разделяется на короткие участки. Этот процесс называется тактированием. Процесс возможен благодаря быстро реагирующим электронным выключателям, транзисторам. Первые транзисторные инверторы работали с тактовой частотой 25 кГц. Сегодня существует возможность применять усовершенствованные транзисторы с тактовой частотой 100 кГц и выше.

После «прерывания» (тактового импульса) тока он преобразуется на необходимую высокую

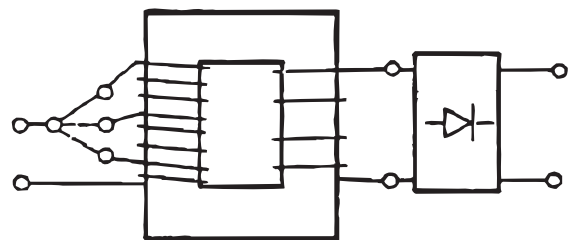


Рис. 12 Принципиальная схема сварочного



Рис. 15 TRITON 220 DC, сварочный инверторный аппарат для сварки ВИГ

силу тока и низкое напряжение. После трансформатора возникает прямоугольный переменный ток, который после этого еще раз выпрямляется. Благодаря высокой тактовой частоте масса трансформатора может быть очень маленькой. Она зависит непосредственно от частоты преобразуемого тока. Поэтому есть возможность изготавливать источники тока небольшой массы. Современные аппараты для сварки ВИГ с напряжением 260 А/20,4 В весят всего 24,5 кг – Рис. 14.

Предыдущее касалось силового блока источников тока.

У электронных источников тока многие функции, для выполнения которых традиционные источники тока требуют такие компоненты, как резисторы, дроссели и конденсаторы, выполняются при помощи электронного устройства управления. Поэтому устройство управления источником тока так же важно, как и его силовой блок. Регулировка тока, например, у импульсных источников происходит путем изменения отношения между временем включения и выключения тока. Для изменения силы тока можно также использовать изменение тактовой частоты. Для производства импульсного тока устройством управления циклично изменяется отношение времени включения/выключения. Подобным образом осуществляется нарастание / спад тока.

Благодаря современной технике стало возможным использование регулируемых источников тока, так необходимых для

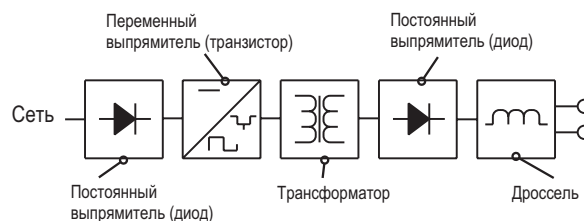


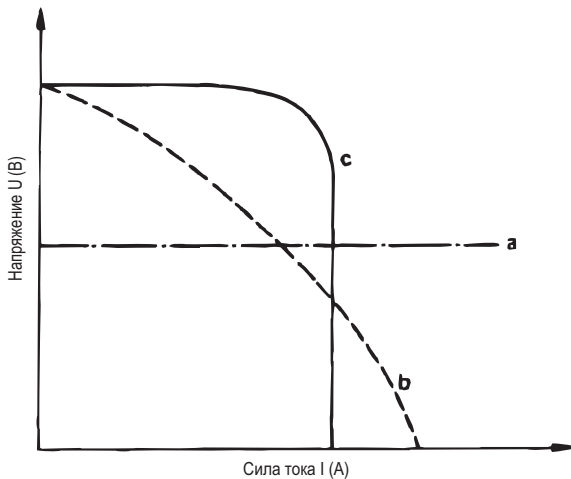
Рис. 16 Блок-схема инвертора 3-го поколения, тактовая частота до 100 кГц

сварочных процессов. Контрольный прибор измеряет сварочный ток и сварочное напряжение и сравнивает с установленными значениями. Если установленные параметры сварки изменяются, например, из-за нежелательного сопротивления в сварочной цепи, то устройство управления выполняет соответствующую регулировку. Это происходит очень быстро, в  $\mu$ s-диапазоне. Подобным образом можно ограничить короткое замыкание и повысить cos  $\phi$ . Повышение КПД и снижение потери при холостом ходе инверторных источников тока происходит уже благодаря уменьшению массы трансформатора.

Источники сварочного тока могут иметь следующие характеристики: горизонтальную (стабильного напряжения), слегка спадающую или вертикально спадающую в рабочей зоне (стабильного тока) – Рис. 17.



Рис. 14 TRITON 260 DC, сварочный инверторный аппарат для сварки ВИГ



**Рис. 17 Статические характеристики источников сварочного тока**

У многих современных источников тока легко изменяется характеристическая кривая, благодаря чему они могут использоваться во многих процессах (мультипроцессорные аппараты). Инверторные источники тока для сварки ВИГ имеют характеристику стабильного тока (Рис. 17,с), то есть в рабочей зоне статическая характеристика вертикально спадает. Это означает, что при изменении длины дуги, чего не всегда удается избежать при ручной сварке, изменяется только напряжение, а не сила тока. Благодаря этому обеспечивается достаточный провар и постоянная мощность плавления. Такие же характеристики можно применить и к ручной дуговой сварке. Если источник тока используется для сварки МИГ/МАГ, то при переключении на этот процесс настраивается характеристика стабильного напряжения (Рис. 17 ,а).

Многие инверторные источники являются программируемыми, что необходимо при механизированной сварке, например, орбитальной сварке ВИГ или при использовании роботов.

## 6 Выполнение сварки

Сварщик, выполняющий сварку ВИГ, кроме теоретических знаний, должен иметь также практические навыки. Их можно получить на курсах по сварке, которые, к примеру, организывает *Schweißen und verwandte Verfahren e.V.* (Немецкий союз по сварочным и близким к ним процессам) в собственных помещениях и учебных заведениях.

### 6.1 Выбор присадки для сварки

Присадка для сварки ВИГ имеет форму прутка, а при полностью механизированной сварке вводится в виде проволоки механизмом подачи.

Как правило, выбирается родственная основному материалу присадка для сварки. Но иногда в металлургии необходимо, чтобы присадка по некоторым легирующим элементам слегка отличалась от основного материала. Это касается, например, углерода, содержание которого в целях трещиностойкости должно быть как можно меньше. В таких случаях говорят об уподобленных основному материалу присадках. Бывают также случаи, когда необходимы чужеродные основному материалу присадки. Например, при сварке трудносвариваемых углеродистых сталей, где применяются аустенитные присадки, а иногда даже никелевые сплавы.

Диаметр присадки для сварки зависит от сварочного задания. Он определяется толщиной материала, а также диаметром вольфрамового электрода, Таблица 3 содержит диаметры электродов, газовых сопел, присадочных прутков, соответствующих разной толщине листа.

Длина сварочного прутка, как правило, составляет 1000 мм. Сварочные прутки поставляются в связках и для того, чтобы избежать путаницы, на каждом из них должны быть либо характеристика согласно DIN, либо торговое обозначение.

### 6.2 Настройка расхода защитного газа

Расход защитного газа настраивается как объемный расход в л/мин. Он определяется размером сварочной ванны, а значит диаметром электрода, диаметром газового сопла, расстоянием от сопла до поверхности основного материала, окружающим воздушным потоком и видом защитного газа – см. раздел «Защитные газы». Эмпирическое правило гласит, что при использовании в качестве защитного газа аргона и наиболее частых диаметрах вольфрамовых электродов от 1 до 4 мм необходимо подавать 5-10 л защитного газа в минуту.

Измерение расхода производится косвенным методом при помощи манометра, который измеряет давление перед встроенным соплом.

Шкала манометра проградуирована непосредственно в л/мин. Более точными являются измерительные приборы, которые измеряют расход посредством стеклянной трубки и поплавкового указателя непосредственно в текущем в горелку газовом потоке –Рис. 18.

### 6.3 Очистка поверхности изделия

Для хорошего результата сварки важно перед началом сварки основательно очистить бока кромок и поверхность изделия в области применения сварки. Поверхности должны быть отполированы и свободны от жира, грязи и краски. Также по возможности необходимо удалить слой окалины. Для этого часто достаточно обработать поверхность щеткой. В тех местах, где этого не достаточно, необходимо отшлифовать или механически обработать поверхность. Для коррозионностойких материалов можно применять только щетки из нержавеющей стали, иначе может возникнуть налет ржавчины от стальных частичек, попадающих на поверхность. Для алюминия из-за возникновения пор особенно важно, чтобы на поверхности не осталось толстых оксидных пленок. Об этом пойдет речь далее. Для очистки и обезжиривания применяются соответствующие растворители. Внимание! При применении хлоросодержащих растворителей существует опасность образования ядовитых паров.

### 6.4 Зажигание электрической дуги

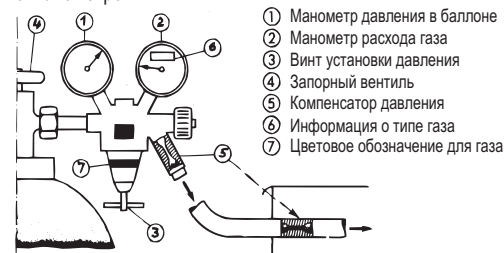
Толщина листа [мм]	Диаметр вольфрамового электрода [мм]	Размер газового сопла №	Диаметр присадочного прутка материала [мм]
1	1,0	4	1,6
2	1,6	от 4 до 6	2,0
3	1,6	6	2,5
4	2,5	от 6 до 8	3,0
5	от 2,5 до 3,0	от 6 до 8	3,2
6	3,2	8	4,0
8	4,0	от 8 до 10	4,0

**Таблица 3 Диаметр вольфрамового электрода, размер газового сопла и диаметр присадочного прутка при различной толщине листа**

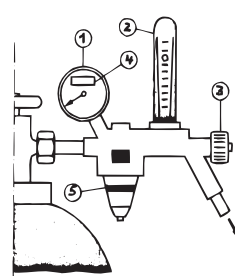
Электрическая дуга никогда не должна загораться за пределами стыка на основном материале, она должна загораться так, чтобы место зажигания непосредственно вслед за этим снова расплавлялось при сварке. В начале сварки раскаленный основной материал очень быстро охлаждается в месте зажигания за счет большой массы холодного материала. Последствиями такого скорого охлаждения могут стать затвердения, возможно с трещинами, и поры. Быстрого охлаждения можно избежать, если зажигание производится непосредственно в начале сварочного шва и все дефекты, которые могут возникнуть, сразу же снова расплавляются.

Контактное зажигание должно применяться только в качестве исключения, если применяемый старый сварочный аппарат не имеет приспособления для зажигания (зажигание импульсами высокого напряжения) – см. также раздел 5.1 Устройство управления. В этом случае зажигание происходит на медной пластинке, вложенной встык рядом с началом сварочного шва. От нее дуга тянется к началу шва, и начинается сварка. При контактном зажигании непосредственно на основном материале в металл шва может попасть вольфрам, который не плавится из-за высокой точки плавления. При просвечивании из-за высокого поглощения рентгеновских лучей его можно распознать как белое место.

С манометром



- ① Манометр давления в баллоне
- ② Манометр расхода газа
- ③ Винт установки давления
- ④ Запорный вентиль
- ⑤ Компенсатор давления
- ⑥ Информация о типе газа
- ⑦ Цветовое обозначение для газа



- ① Манометр давления в баллоне
- ② Измерительная трубка с плавающим шариком
- ③ Винт установки давления
- ④ Информация о типе газа
- ⑤ Цветовое обозначение для газа

**Рис. 18 Измерение расхода защитного газа**

## 6.5 Ведение горелки

При сварке ВИГ применяется «сваривание налево», Рис. 19. Однако это определение является точным только тогда, когда сварщик ведет горелку правой рукой, а присадочный материал левой рукой, как это принято у правой и если смотреть на положение с позиции сварщика. Более точно определяется направление сварки, когда говорят, что сварочный пруток ведется горелкой.

Это относится ко всем положениям, если только это не сварка вертикального шва сверху вниз. Иногда при сварочных заданиях из-за высокой мощности плавления применяют сварку направо.

Горелка устанавливается под углом  $20^\circ$  к вертикали в направлении сварки, сварочный пруток при этом подводится спереди практически горизонтально, под углом  $15^\circ$  к поверхности изделия.

Вначале дуга плавит сварочную ванну. Потом в ней под дугой плавится сварочный пруток, причем сварщик выполняет прутком касательные движения вперед и назад. При этом пруток при сварке подвигают не слишком далеко под дугу, иначе снизится провар в основном материале. Это полезно и при сварочных заданиях, когда необходимо как можно меньшее перемешивание.

При соединительной сварке конец стержня должен оплавиться в переднем крае сварочной ванны. При этом сварщик должен следить за тем, чтобы расплав при касательных движениях не вышел из среды защитного газа. Последствием может стать окисление прутка и попадание оксида в сварочную ванну.

Как правило, сварку выполняют небольшими качательными движениями. Тогда меньше всего повреждается среда защитного газа. В

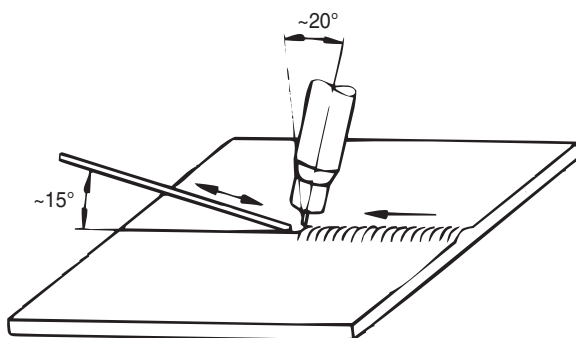


Рис. 19 Размещение горелки и присадочного прутка [1]

позиции РГ (вертикально вверх) нужно выполнять небольшие качательные движения горелки и сварочного стержня. То же самое относится к прослойкам в толщине, которые нельзя больше наполнить одним наплавленным валиком, и которые слишком малы для двух валиков.

## 6.6 Эффект магнитного выдувания дуги

Под эффектом выдувания дуги понимают явление, когда при отклонении дуги от центральной оси она удлиняется и шипит. При таком отклонении могут образоваться дефекты. Так, провар может стать недостаточным, и при сварочных процессах с образованием шлака в шве могут появиться шлаковые включения.

Отклонение происходит из-за сил, вызываемых окружающим магнитным полем. Как и каждый проводник с током, электрод и электрическую дугу окружает кольцеобразное магнитное поле. Оно отклоняется в области дуги при переходе в основное вещество. Из-за этого силовые линии магнитного поля на внутренней стороне сжимаются, а на внешней стороне расширяются – (Рис. 20а).

Электрическая дуга отклоняется в область пониженной плотности магнитных силовых линий. При этом она удлиняется, и из-за повышенного напряжения дуги получается шипящий звук. Противоположный полюс, таким образом, оказывает отталкивающее действие на дугу.

Воздействие другой силы сдвига проявляется потому, что магнитное поле лучше распространяется в ферромагнитном материале, чем в воздухе. Поэтому дуга притягивается большими массами металла.

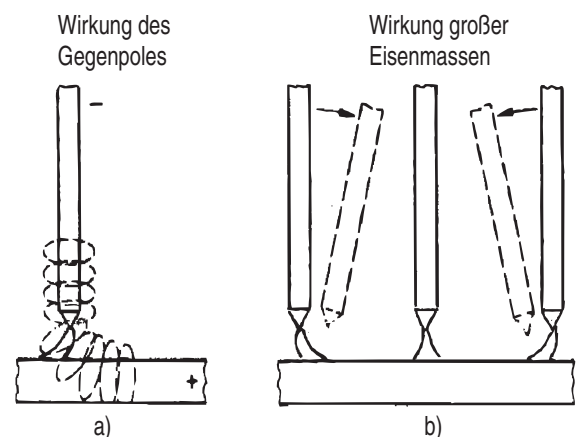


Рис. 20 Эффект магнитного выдувание дуги

Это проявляется, например, в том, что дуга при сварке на намагничивающемся материале на концах листа сворачивается вовнутрь.

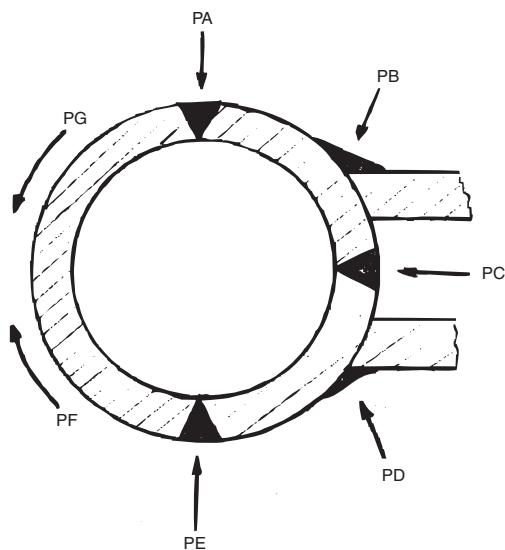
Отклонение дуги можно устранить установкой электрода под углом – (Рис. 20b). Поскольку эффект выдувания дуги особенно высок при сварке постоянным током, то необходимо, где это возможно, заменять его переменным током или, как минимум, понижать.

Особенно сильным эффект выдувания дуги может быть при сварке корня шва из-за окружающей массы металла. Помочь здесь могут тесно расположенные рядом не слишком короткие прихватки, поддерживающие магнитный поток.

## 6.7 Положения сварного шва

Согласно ISO 6947, положения сварного шва обозначаются PA – PG. Они располагаются, если смотреть на трубу сверху (PA), по часовой стрелке в алфавитном порядке – Рис.21.

Позиция PA соответствует той, которую раньше в Германии обозначали горизонтальным положением или положением «в лодочку». Далее следует положение стыкового шва PC (горизонтальный на вертикальной стене) и PE (потолочный шов), а также позиции таврового сварного шва PB (горизонтальный) и PD (горизонтальный/потолочный). При сварке листов PF означает, что шов сваривается вертикально снизу вверх, а PG – вертикально сверху вниз. На трубе собрано множество позиций. Позиция PF действует, если труба сваривается в потолочном положении без вращения в обе стороны снизу вверх, позиция



**Рис.21 Положения сварных швов согласно ISO 6947**

PG действует соответственно тогда, когда шов сваривается вертикально сверху вниз. ВИГ сварку можно выполнить во всех положениях. При этом параметры режима сварки должны соответствовать параметрам других методов сварки в данном положении.

## 6.8 Параметры сварки

Нижние границы применения сварки ВИГ для стали – 0,3 мм, для алюминия и меди – 0,5 мм. Верхние границы сварки ограничены экономической целесообразностью. Мощность плавления процесса не очень высокая. Поэтому сваркой ВИГ часто заваривается только корень шва, а во всех остальных случаях применяют другие методы (E, МАГ), имеющие более высокую мощность.

При выборе параметров сварки нужно помнить, что на сварочном аппарате настраивается только сила тока, а напряжение дуги определяется длиной дуги, которую соблюдает сварщик. При этом напряжение растет с увеличением длины дуги. За ориентировочное значение для сварки проплавлением постоянным током (отрицательный полюс) берут достаточную для проплавления силу тока: 45 А на 1 мм толщины стенки. При сварке алюминия переменным током необходимо иметь 40 А/мм.

Подходящими параметрами сварки стыкового шва на различных материалах могут быть от Таблица 4 до Таблица 8 .

Толщина листа [мм]	Форма кромки	Число положений	Диаметр вольфрамового электрода [мм]	Сварочный ток [А]	Скорость сварки [см/мин]
1,0	I	1	1,0	45	32
2,0	I	1	1,6	100	30
3,0	I	1	1,6	125	30
4,0	I	2	2,4	170	25
5,0	I	2	3,2	225	22
6,0	V	2	4,0	300	20

**Таблица 4** Ориентировочные значения сварки ВИГ высоколегированной стали  
Вид тока: Постоянный ток («-» полюс) – Поз. РА – Защитный газ: Аргон [1]

Толщина листа [мм]	Форма кромки	Число положений	Диаметр вольфрамового электрода [мм]	Сварочный ток [А]	Скорость сварки [см/мин]
4,0	I	2	2,0	90	24
6,0	I	2	2,4	110	20
8,0	I	2	2,4	120	18
10,0	DV	2	2,4	120	16
12,0	DV	2	3,2	140	15

**Таблица 5** Ориентировочные значения для сварки ВИГ алюминия, вид тока: Переменный ток – Поз. PF – Защитный газ: Аргон [3]

Материал	Толщина листа [мм]	Форма кромки	Число положений	Диаметр вольфрамового электрода [мм]	Сварочный ток [А]	Скорость сварки [см/мин]
Чистый никель	1,0	I	1	1,0	65	13
	1,5	I	1	1,6	90	12
	3,0	I	1	2,4	140	10
	5,0	V	3	2,4	145	12
	10,0	V	8	2,4	150	12
Медь	1,5	I	1	1,6	130	28
	3,0	I	1	3,2	200	25
	5,0	I	2	4,0	270	15

**Таблица 6** Ориентировочные значения для сварки ВИГ никеля и меди, вид тока: Постоянный ток («-» полюс) – Поз. РА – Защитный газ: Аргон [3], [1]

Толщина листа [мм]	Форма кромки	Число положений	Диаметр вольфрамового электрода [мм]	Сварочный ток [А]	Скорость сварки [см/мин]
1,0	I	1	1,0	60	32
2,0	I	1	1,6	110	30
3,0	I	1	1,6	140	30
4,0	I	2	2,4	190	25
5,0	I	2	3,2	250	22
6,0	V	2	4,0	350	20

**Таблица 7** Ориентировочные значения для сварки ВИГ нелегированной и низколегированной стали  
Вид тока: Постоянный ток («-» полюс) – Поз. РА – Защитный газ: Аргон [1]

Толщина листа [мм]	Форма кромки	Число положений	Диаметр вольфрамового электрода [мм]	Сварочный ток [А]	Скорость сварки [см/мин.]
1,0	I	1	1,6	75	26
2,0	I	1	2,0	90	21
3,0	I	1	2,4	125	17
4,0	I	1	3,2	160	15
5,0	V	2	3,2	165	от 14 до 17
6,0	V	2	4,0	185	от 10 до 15

**Таблица 8** Ориентировочные значения для сварки ВИГ алюминия, вид тока: Переменный ток – Поз. РА – Защитный газ: Аргон [3]



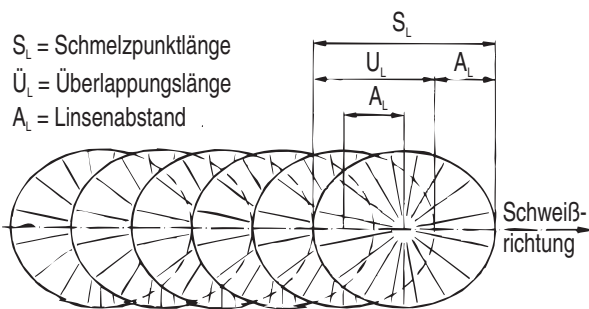


Рис. 24 Структура сварного шва, состоящего из отдельных сварных точек [2]

### 6.9 Сварка импульсами тока

При сварке импульсным током сила тока и напряжение изменяются в ритме частоты импульсов между нижним и верхним значениями импульса – Рис. 22.

Современные инверторные источники позволяют настроить импульсную частоту в диапазоне от 0,5 до 300 Гц. Специальные источники имеют частоту в кГц диапазоне.

В высоком частотном диапазоне реализуются такие эффекты, как уменьшение размера зерен в металле шва и сужение дуги, в низком диапазоне частот из-за лучшего управления сварочной ванной при сварке в неудобных положениях прежде всего выбирается позиция РF. Это происходит следующим образом (Рис. 24):

Под влиянием высокого импульсного тока происходит провар основного материала и образуется точечная сварочная ванна. Она начинает затвердевать под действием

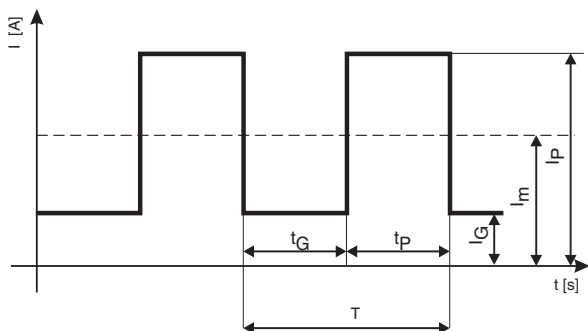


Рис. 22 Временная зависимость сварочного тока при импульсной сварке

- $I_G$ : Главный ток
- $I_M$ : Средний ток
- $I_P$ : Импульсный ток
- $t_G$ : Период главного тока
- $t_P$ : Период импульсного тока
- $T$ : 1 период =  $1/f$
- $f$ : частота тока в сети

следующего низкого главного тока, начиная от края, пока следующий импульс тока снова не расплавит и не увеличит е. Между тем дуга уже перешла на скорость сварки, и поэтому сварной шов при импульсной сварке ВИГ образуется из многих соединенных внахлестку сварочных точек. Диаметр сварочной ванны в среднем меньше, чем при сварке равномерным током, что позволяет лучше сваривать в неудобных положениях. Несмотря на это обеспечивается достаточный провар. Описанный эффект наступает только тогда, когда наступает достаточная разность температур в сварочной ванне между фазами главного и импульсного тока. Это возможно только при импульсной частоте чуть ниже 5 Гц.

К недостаткам можно отнести то, что скорость сварки при импульсной сварке необходимо значительно снизить. Сварщик также различает пульсацию в низком частотном диапазоне частот как раздражающее мерцание дуги. Поэтому этот вариант сварки ВИГ меньше используется при ручной сварке, где сварщик имеет другие возможности для контроля сварочной ванны, в отличие от механизированной сварки ВИГ.

### 6.10 Возможности механизирования процесса сварки

Метод ручной сварки ВИГ (Рис. 23) можно механизировать довольно простыми средствами. В этом есть необходимость при

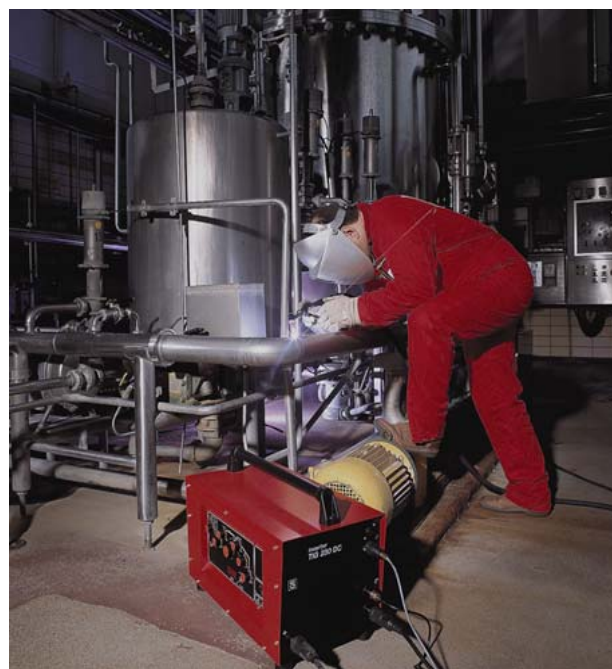


Рис. 23 TIG 230 DC, сварка ВИГ в пищевой промышленности

сварке листов длинными продольными швами или частой сварке кольцевых швов на трубообразных изделиях.

При сварке продольными швами горелка прифланцовывается к простому ходовому механизму, с которым она передвигается по свариваемому стыку. Если в геометрии кромки встречаются дефекты, то рекомендуется использовать подкладку.

При сварке кольцевых швов горелка стационарно подвешивается, а изделие двигается во вращателе под горелкой.

При сварке ВИГ сложных изделий применяются сварочные роботы.

Во всех случаях, когда необходим присадочный материал, он подается к дуге в виде проволоки устройством подачи.

### 6.11 Техника безопасности

Сварка ВИГ является очень чистым процессом. Практически не возникает вредных газов и дыма, поэтому действующие инструкции по технике безопасности не требуют их отвода непосредственно в месте возникновения. Достаточно свободного проветривания или технической вентиляции помещения. Но сварщик должен обезопасить себя от излучения дуги и опасности поражения электрическим током.

Для защиты от инфракрасного и ультрафиолетового излучения сварщик ВИГ обычно одевает на голову маску сварщика, Рис. 23, которая освобождает обе его руки для управления горелкой и внесения присадочного материала. В маску сварщика встроен специальный защитный фильтр. Эти фильтры недавно были стандартизированы в стандарте DIN EN 169. Есть разные степени защиты, которые должны быть надежно нанесены на стекло. При сварке ВИГ в зависимости от применяемой силы тока используются фильтры со степенью защиты от 9 до 14, причем 9-я степень относится к сварке с низкой силой тока, а 14-я – с высокой.

Наибольшую электрическую опасность представляет напряжение холостого хода. Это самое высокое напряжение, которое возникает на включенном источнике тока между соединительными муфтами, если не загорается электрическая дуга. После зажигания дуги напряжение значительно падает, при сварке ВИГ до 12-20 В. Согласно правилам техники

безопасности UVV VBG 15 пиковое напряжение холостого хода источников постоянного тока при нормальной эксплуатации должно быть макс. 113 В. У аппаратов, работающих на переменном токе, это значение тоже равняется 113 В, но действующее значение не должно превышать 80 В. При повышенной электрической опасности, например, при сварке в узких местах или на больших металлических массах, для переменного тока действуют сниженные значения, например, пиковое значение 66 В и действующее значение 48 В. Новые источники сварочного тока, которые отвечают данному требованию, согласно DIN EN 60974-1 имеют знак «S». Старые источники тока обозначаются символами «K» (постоянный ток) или «42 В» (переменный ток). От поражения электрическим током сварщика лучше всего защищают кожаные сварочные перчатки без повреждений и хорошо изолированная рабочая одежда, включая обувь.

## 7 Особенности различных материалов

Как уже говорилось, метод сварки ВИГ подходит для сваривания самых разных материалов. При этом одни материалы свариваются постоянным током, другие - переменным. В Таблица 9 указано, какие

Материал	Постоянный ток		Переменный ток
	Электрод – Плюс	Электрод «+» минус	
Углеродистая сталь	XX	-	-
Нержавеющая сталь	XX	-	-
Алюминий, сплавы алюминия	-	X <sup>1)</sup>	XX
Магний, сплавы магния	-	X <sup>1)</sup>	XX
Медь	XX	-	-
Алюминиевая бронза	X	-	XX
Кремнистая бронза	XX	-	-
Латунь	X	-	XX
Никель, сплавы никеля	XX	-	X
Титан	XX	-	-

Таблица 9 Подходящий для различных материалов вид тока Защитный газ: чистый аргон

<sup>1)</sup> только для тонких материалов

XX = наилучшие результаты,

X = пригодный,

- = не рекомендуется

материалы лучше сваривать постоянным током, а какие - переменным.

Далее описываются особенности различных материалов.

### 7.1 Нелегированная и низколегированная сталь

Эти стали можно соединять всеми методами сварки плавлением. При выборе метода сварки чаще руководствуются экономическими соображениями, чем качеством. Поэтому сварка ВИГ, отличающаяся низкой мощностью, не часто применяется для сварки этих сталей. Исключением является сварка корня шва. При толщине стенки более 6 мм сваркой ВИГ заваривается только корень шва, а остальные операции выполняются методами сварки большей мощности. Вторым исключением является сварка трубопроводов малых диаметров. Для таких случаев нет ничего лучшего, чем сварка ВИГ.

Особенность состоит в том, что может начаться порообразование, например, в нелегированной трубной стали (например, P235), которая содержит мало кремния, а также при приваривании таких труб к основанию котла. Порообразование может начаться у сталей глубокой вытяжки, успокоенных только алюминием, если сварка выполняется с малым количеством присадочного материала. Из-за поглощения кислорода из атмосферы, чего нельзя полностью избежать даже при сварке в среде защитного газа, металл шва становится беспокойным, и из-за образования монооксида углерода в металле шва могут образоваться поры. Для устранения порообразования вносят как можно больше кремний-магниевого присадочного материала, благодаря чему кислород соединяется без вреда для шва.

### 7.2 Аустенитные хромоникелевые стали

Этот материал особенно хорошо подходит для сварки ВИГ, поскольку благодаря хорошей вязкости металла шва образуются хорошо подогнанные гладкие верхние валики шва и плоская нижняя сторона корня шва.

В результате относительно небольшой скорости сварки ВИГ и низкой теплопроводности хромоникелевых сталей при малой толщине стенки легко достигается перегрев. Из-за этого могут образоваться горячие трещины, которые снижают коррозионную стойкость. Перегрева при

необходимости можно избежать, если использовать перерывы на охлаждение или охлаждение самого изделия. Охлаждение будет также способствовать уменьшению коробления, которое из-за высокого коэффициента расширения у хромоникелевых сталей больше, чем у нелегированных сталей.

У конструкций, подвергающихся впоследствии коррозионному воздействию, после сварки с поверхности шва и с обоих краев основного материала необходимо при помощи щетки, излучения, шлифовки или легкого травления удалить оставшуюся оксидную пленку и побежалость. Только после этого конструкции пригодны к дальнейшей эксплуатации. В противном случае оксидные пленки приведут к сильному коррозионному разрушению. Это также относится к сварке труб, где необходимо очистить обе стороны корня шва. Поскольку механическую обработку произвести очень трудно, то рекомендуется предотвращать окисление при помощи формовки – см. раздел 3.4 Формовка.

### 7.3 Алюминий и алюминиевые сплавы

Для сварки материалов из алюминия, за исключением случаев, описанных ниже, применяется переменный ток. Это необходимо для устранения на расплаве тугоплавкой оксидной пленки. Точка плавления оксида

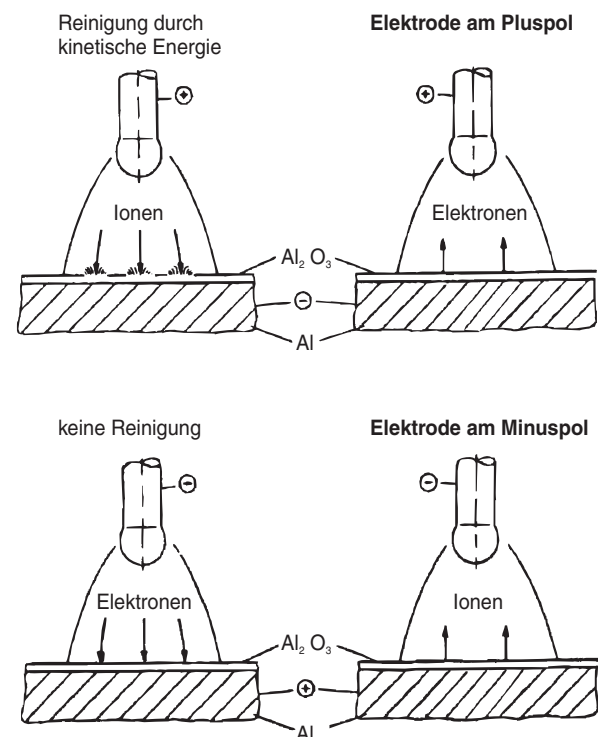


Рис. 25 Иллюстрация очищающего эффекта

алюминия ( $Al_2O_3$ ) составляет около 2050 °С. При этом основной материал, например, чистый алюминий, плавится уже при температуре 650 °С. Алюминий имеет такое большое химическое сродство с кислородом, что, если поверхность основного материала перед сваркой очистить щеткой или скребком от окиси, то на поверхности расплава очень скоро вновь образуется оксидная пленка. Эта пленка из-за высокой точки плавления лишь частично расплавляется под электрической дугой. Таким образом, если бы сварка осуществлялась постоянным током (отрицательный полюс), то большая часть поверхности покрывалась бы прочным слоем оксида алюминия. Это делает невозможным наблюдение за расплавом и затрудняет внесение присадочного материала. Конечно, оксидный слой можно было бы устранить путем использования флюсующих добавок, как это происходит при пайке, но это означало бы и дополнительные расходы.

При сварке переменным током открывается возможность разрушить и устранить оксидный слой при помощи носителей заряда в электрической дуге. Для этого подходят только ионы, поскольку электроны из-за своей малой массы не обладают достаточной для такого процесса кинетической энергией. На Рис. 25 показан поток носителей заряда в электрической дуге.

Когда отрицательный полюс находится на электроде, электроны перемещаются от электрода к изделию, а остаточные ионы от изделия к электроду. При такой полярности невозможен очищающий эффект. При обратной полярности более тяжелые ионы попадают на поверхность изделия. За счет своей кинетической энергии они могут разрушить и устранить оксидный слой.

Если бы сварка выполнялась на горячем положительном полюсе, то у электрода была бы очень низкая токонагрузочная способность. Поэтому данный вариант сварки ВИГ применим только для сварки очень тонких алюминиевых конструкций (с толщиной стенки до 2,5 мм). Компромиссное решение предлагает переменный ток. Когда на электроде находится позитивная полуволна, возникает очищающий эффект. Следующая за ней негативная полуволна снова охлаждает электрод. Поэтому

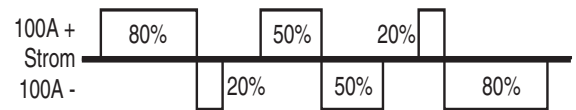


Рис. 26 Варианты настройки баланса полуволн при прямоугольном переменном токе

говорят об очищающей и охлаждающей полуволнах. Токонгрузочная способность при сварке переменным током меньше, чем при сварке постоянным током на отрицательном полюсе. Но она значительно выше, чем при сварке на положительном полюсе – см. также Таблица 1. Это показывает, что для достаточного очищающего эффекта совсем не нужно целой позитивной полуволны, а достаточно 20 или 30%. Именно это используется в современных источниках тока для сварки ВИГ. Они производят искусственный прямоугольный переменный ток, в котором с помощью быстро реагирующих выключателей (транзисторов) на электрод попеременно переключается положительный и отрицательный полюс источника постоянного тока. При этом баланс отношения обоих полуволн может изменяться, например, от 20 % положительной/80 % отрицательной до 80 % положительной/20 % отрицательной (Рис. 26).

Меньшая фаза положительного полюса обеспечивает более высокую токонагрузочную способность электрода, а при одинаковой установке тока – большую стойкость. В таких так называемых «прямоугольных источниках» может часто изменяться и частота искусственного переменного тока, например, от 50 до 300 Гц. Повышение частоты способствует сохранению электрода.

Прямоугольный искусственный переменный ток обладает и другими преимуществами. Поскольку ток при смене полярности имеет очень крутую характеристику, то время запаздывания дуги при прохождении через ноль значительно короче, чем при синусоидальной форме тока. Поэтому происходит более надежное зажигание, даже без использования приспособления для зажигания, а электрическая дуга в целом стабильнее. При этом повторные зажигания дуги сопровождаются сильным гудением. Современные источники тока для сварки ВИГ позволяют выполнять сварку постоянным током, а также синусоидальным и прямоугольным переменным током, Рис. 27.

В настоящее время также применяют вариант сварки ВИГ на отрицательном полюсе, при котором используется защитный газ с высоким содержанием гелия (например, 90 % He / 10 % Ar). При сварке на отрицательном полюсе, как уже было описано, оксидная пленка на поверхности не разрушается. Однако она расплавляется при высокой температуре мощной гелиевой дуги. Поэтому она лишь немного повреждается. Сварка ВИГ постоянным током на отрицательном полюсе в среде гелия благодаря лучшему провару применяется, в первую очередь, при ремонтных сварках литых деталей из алюминий-кремниевых сплавов.

Следующей особенностью сварки такого материала, как алюминий, является его чувствительность к порообразованию при поглощении водорода. Тут ситуация намного критичнее, чем при сварке стали. Тогда как сталь при переходе из жидкого в твердое состояние еще обладает способностью растворять в себе водород в объеме 8 см<sup>3</sup> на 100 г металла шва, то алюминий в твердом состоянии практически не обладает такой способностью. Это значит, что весь водород, который поглощается при сварке, должен покинуть металл шва до того, как тот затвердеет. В противном случае в металле шва образуются поры.

Источниками водорода при сварке ВИГ алюминия, в первую очередь, могут быть оксидные пленки на основном материале. Они связывают влагу, и поэтому их надо удалить



**Рис. 27 TRITON 220 AC/DC, инверторный сварочный аппарат для сварки ВИГ**

перед сваркой щеткой или скребком. С другой стороны, дуга спокойнее, если на поверхности находится оксидная пленка, так как она легче испускает электроны, чем чистый металл. Поэтому необходимо найти компромисс между стабильной электрической дугой и достаточной стойкостью против порообразования. Более эффективным показал себя способ, когда перед сваркой поверхность изделия основательно очищается от окисей, но сварка выполняется только через час или два, когда образуется новый тонкий оксидный слой. Порообразованию способствуют также оксидная пленка на поверхности сварочного прутка. Поэтому присадочные материалы из алюминия необходимо хранить очень тщательно и не очень долго.

#### **7.4 Медь и медные сплавы**

Сварка меди усложняется, прежде всего, большой теплопроводностью меди. Поэтому при высокой толщине материала необходимо подогреть, как минимум, начало сварочного шва. Далее эффект подогрева развивается сварочным теплом, поэтому обширный прогрев необходим только при толщине стенки > 5 мм. Метод сварки ВИГ позволяет использовать для подогрева саму дугу, когда тепло вносится в начало сварочного шва вращательными движениями удлиненной дугой.

Чистая медь, а также многие ее сплавы свариваются постоянным током и электродом на отрицательном полюсе. Переменным током свариваются только некоторые сорта бронзы, такие как латунь и алюминиевая бронза.

#### **7.5 Другие материалы**

Кроме уже описанных материалов, для которых применяется сварка ВИГ, необходимо также отметить никель и его сплавы. Наиболее важными являются хромоникелевые сплавы (например, инконель) и медноникелевые сплавы (например, монель-металл). Сварка ВИГ может также применяться для титана и его сплавов. Для этих материалов лучше всего подходит постоянный ток с отрицательно поляризованным электродом. При сварке титана необходимо, чтобы в среде защитного газа находилась не только область сварочного шва, но и металл на значительном удалении от места сварки, а чтобы избежать цвета побежалости, необходимо подавать защитный газ и на обратную сторону шва. Иначе

материал станет хрупким из-за поглощения атмосферных газов.

## 8 Применения сварки ВИГ

Примеры использования сварки ВИГ показаны на Рис. 28 по Рис. 32. Методом сварки ВИГ соединяются преимущественно тонкостенные изделия, у толстых же материалов этим методом сваривается только корень шва, а сварка заполняющего и облицовочного слоев выполняется более эффективными методами. Поэтому согласно статистике лишь 2% от общего количества выполненных в Германии сварочных швов выполнены сваркой ВИГ. Такое состояние можно оценить, как неблагоприятное, так как оно одновременно свидетельствует о большом расходе присадочного материала. При сварке ВИГ обычно расходуется мало присадки для сварки. Поэтому реальная доля данного метода сварки должна быть выше, хотя она все равно не достигнет доли, приходящейся на ручную сварку электрической дугой, которая составляет около 7,5%. Несмотря на это сварка ВИГ является очень важным методом сварки. Ее преимущества уже были описаны выше в этой брошюре.

### 8.1 Отрасли производства

Сварка ВИГ применяется, в основном, в производстве котлов, резервуаров, приборостроении и строительстве трубопроводов, в авиационно-космической промышленности, а также при изготовлении продольно сварных труб из высококачественной стали.

Сварка ВИГ широко применяется также в инструментальном производстве, поскольку позволяет восстанавливать очень тонкие контуры, например, штампов и режущих инструментов.

### 8.2 Примеры применения

На Рис. 29 показано применение ручной сварки ВИГ в приборостроении.

На корпус из нержавеющей хромоникелевой стали (W.-Номер 1.4301) приваривается фланец. Используемый сварочный аппарат TRITON 160 DC обеспечивает до 160 А постоянного тока при продолжительности включения 50 %.



Рис. 28 Применение PICOTIG 160 HF

Пример сварки хромоникелевой стали в химической промышленности показан на Рис. 30

На трубопроводах из данного материала кольцевые швы выполняются сваркой ВИГ постоянным током. Здесь применяется более эффективный сварочный аппарат TRITON 260 DC с номинальным током 260 А. При этом метод сварки ВИГ выбран потому, что



Рис. 29 TRITON 160 DC, сварка ВИГ в аппаратостроении



Рис. 30 TRITON 260 DC, сварка ВИГ трубопроводов

требуется безупречное проплавление корня шва снаружи. При таких сварочных работах необходима формовка внутренней части трубы. Как уже упоминалось, особой областью применения сварки ВИГ является авиационно-космическая промышленность. На Рис. 31 показано применение данного процесса при ремонте смесительной камеры двигателя самолета.

Основным материалом здесь является высокожаропрочный и коррозионностойкий



Рис. 31 Сварка ВИГ при ремонте деталей силового агрегата



Рис. 32 Сварка ВИГ при приваривании труб к трубным решеткам

никелевый сплав.

На Рис. 32 показано, как трубы из жаропрочной стали привариваются к трубной решетке теплообменника. Здесь речь идет о ручной сварке.

Но очень часто такие сварочные работы механизуются. В этом случае горелка центрируется внутри трубы при помощи зажимной оправки. Она движется, как правило, начиная с позиции перед РА по круговой траектории вокруг трубы (орбитальная сварка). При этом также можно добавлять присадочный материал. Поскольку друг за другом проходятся все позиции – от горизонтальной до нисходящей, от потолочной до восходящей, то используемые для этого источники сварочного тока можно запрограммировать, чтобы параметры сварки каждой позиции оптимально согласовывались друг с другом. Такие орбитальные сварки ВИГ также применяются для стыковых швов на трубах. В таких случаях горелка движется в цанговом зажиме вокруг трубы.





## 9 Литература

[1] R. Killing: Handbuch der Schweißverfahren, Teil 1: Lichtbogenschweißen Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 76/I, DVS-Verlag GmbH Düsseldorf 1999

[2] R. Killing: Kompendium der Schweißtechnik Band 1: Verfahren der Schweißtechnik Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 128/I, DVS-Verlag GmbH Düsseldorf 1997

[3] G. Aichele: Leistungskennwerte für Schweißen und Schneiden Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 72, DVS-Verlag GmbH Düsseldorf 1994

## 10 Публикации

Справочное руководство по сварке ВИГ, издание 2, 2002 г.

Из сводного издания EWM «Вокруг сварки»

Все права защищены

Перепечатка, даже в виде выдержек, запрещена. Запрещается без письменного согласия фирмы EWM тиражировать и распространять брошюру, а также отдельные ее части в любой форме (фотокопия, микрофильм или иной способ).

© EWM HIGHTEC WELDING GmbH

Dr.-Günter-Henle-Str. 8

D-56271 Mündersbach

Тел.: +49(0)2680.181-121

Факс: +49(0)2680.181-161

<mailto:info@ewm.de>

<http://www.ewm.de>

Набор:

EWM HIGHTEC WELDING GmbH, Mündersbach

Печать:

Müller Digitaldruck GmbH, Montabaur



# Мы предлагаем следующую информацию:

В серии справочной литературы «Вокруг сварки» можно найти пособия и разъяснительные плакаты по ручной сварке стержневыми электродами, сварке ВИГ, плазменной сварке и сварке МИГ/МАГ.



Кроме того, все эти сведения можно получить в Интернете по адресу. . .



[www.ewm.de](http://www.ewm.de)

Брошюры: изображения, темы, описание продуктов.



Специализированные статьи и другие материалы о высокопроизводительной сварке МАГ, плазменной сварке по алюминию или импульсной сварке ВИГ.



Продажа, консультации, обслуживание

**EWM** / HIGHTEC®  
WELDING

**SIMPLY MORE**

EWM HIGHTEC WELDING GmbH

Dr.-Günter-Henle-Strasse 8 · D-56271 Mündersbach

Phone +49(0)26 80-18 10 · Fax +49(0)26 80-18 12 44

[www.ewm.de](http://www.ewm.de) · [info@ewm.de](mailto:info@ewm.de)