

# В

ДЛЯ ВУЗОВ

---

*С.А. Федосов, И.Э. Оськин*

## ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по нефтегазовому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 130501 «Проектирование, сооружение и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ» направления подготовки дипломированных специалистов 1300500 «Нефтегазовое дело»*



---

МОСКВА  
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»  
2011

УДК 621.79  
ББК 31.37  
Ф33

Рецензенты:

чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф. Самарского государственного  
аэрокосмического университета *В.А. Барвинок*;  
канд. техн. наук, проф. Тольяттинского государственного  
университета *М.Г. Козулин*

**Федосов С. А., Оськин И. Э.**

Ф33 Основы технологии сварки: учебное пособие. — М.: Машино-  
строение, 2011. — 125 с.

ISBN 978-5-94275-570-6

Даны основы теории сварки плавлением (теплофизика сварочных процес-  
сов, физика дугового разряда, основы металлургических процессов в варочной  
ванне, формирование зон термического влияния).

Приведена классификация видов сварки и сварных швов, рассмотрены тех-  
нология и оборудование дуговой сварки, кратко описаны другие виды сварки  
(электроконтактная, газовая холодная сварка давлением, диффузионная в ва-  
кууме, сварка трением, электрошлаковая, плазменная, электронно-лучевая, ла-  
зерная, ультразвуковая, термитная), а также технологии и оборудование для ог-  
невой резки.

Уделено внимание механизмам образования сварочных дефектов, напряже-  
ний и деформаций, методам их предотвращения, методам контроля качества  
сварных швов, технике безопасности при сварочных работах.

Для студентов высших технических учебных заведений. Может быть полез-  
ным специалистам сварочного производства.

УДК 621.79  
ББК 31.37

ISBN 978-5-94275-570-6

© Издательство «Машиностроение»,  
2011

© Федосов С.А., Оськин И.Э., 2011

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

---

|   |    |
|---|----|
| <b>Введение</b> . . . . .   | 5  |
| <b>Глава 1. Основные понятия</b> . . . . .  | 6  |
| 1.1. Определение понятия «сварка» . . . . .   | 6  |
| 1.2. Физическая сущность сварки . . . . .   | 7  |
| 1.3. Классификация видов сварки . . . . .   | 7  |
| 1.4. Резка и размерная обработка . . . . .  | 8  |
| <b>Глава 2. Теория сварки</b> . . . . .   | 10 |
| 2.1. Основы теплофизики сварки . . . . .  | 10 |
| 2.1.1. Баланс энергии при сварке, понятие об эффективном<br>и термическом КПД . . . . . | 10 |
| 2.1.2. Теплосодержание сварочной ванны . . . . .  | 13 |
| 2.1.3. Теплопередача при сварке . . . . .   | 13 |
| 2.1.4. Упрощения и постановка задачи при проведении реальных<br>расчетов . . . . .      | 15 |
| 2.1.5. Влияние режимов сварки на температурные поля . . . . .                           | 16 |
| 2.1.6. Быстродвижущиеся тепловые источники . . . . .                                    | 16 |
| 2.1.7. Понятие термического цикла . . . . .   | 17 |
| 2.1.8. Термический цикл при многопроходной сварке . . . . .                             | 21 |
| Примеры решения теплофизических задач . . . . .   | 21 |
| 2.2. Свойства электрической дуги . . . . .  | 24 |
| 2.2.1. Основы физики дугового разряда . . . . .   | 24 |
| 2.2.2. Массоперенос в дуге . . . . .  | 28 |
| 2.2.3. Электрические характеристики дуги . . . . .                                      | 29 |
| 2.2.4. Особенности сварки на переменном токе . . . . .                                  | 30 |
| 2.2.5. Устойчивость системы дуга — источник питания . . . . .                           | 30 |
| 2.2.6. Магнитное дутье . . . . .  | 33 |
| 2.3. Основы металлургии и металловедения сварки . . . . .                               | 34 |
| 2.3.1. Сварочная ванна . . . . .  | 34 |
| 2.3.2. Металлургические процессы при сварке . . . . .                                   | 37 |
| 2.3.3. Взаимодействие расплава с газами . . . . .                                       | 38 |
| 2.3.4. Защита сварочной ванны . . . . .   | 39 |
| 2.3.5. Газовая динамика и сопловый аппарат . . . . .                                    | 42 |
| 2.3.6. Зона термического влияния . . . . .  | 45 |
| 2.3.7. Сварочные деформации и напряжения . . . . .                                      | 48 |
| 2.3.8. Технологическая прочность . . . . .  | 53 |
| 2.3.9. Свариваемость . . . . .  | 56 |
| <b>Глава 3. Практика сварки</b> . . . . .   | 61 |
| 3.1. Сварные швы . . . . .  | 61 |
| 3.1.1. Классификация сварных соединений и швов . . . . .                                | 61 |
| 3.1.2. Основные геометрические параметры сварных швов . . . . .                         | 63 |
| 3.1.3. Обозначения сварных швов на чертежах . . . . .                                   | 63 |

---

|   |            |
|---|------------|
| 3.1.4. Подготовка деталей к сварке, сварочно-монтажные работы . . . . . | 65         |
| 3.2. Дуговая сварка . . . . .   | 68         |
| 3.2.1. Виды дуговой сварки . . . . .                                    | 69         |
| 3.3.2. Сварочное оборудование . . . . .                                 | 70         |
| 3.2.3. Источники питания сварочной дуги . . . . .                       | 72         |
| 3.2.4. Основные технические требования к источникам питания . . . . .   | 75         |
| 3.2.5. Сварочные материалы . . . . .                                    | 76         |
| 3.2.6. Выбор основных параметров дуговой сварки . . . . .               | 80         |
| 3.2.7. Влияние режимов сварки на параметры сварного шва . . . . .       | 84         |
| 3.2.8. Техника и приемы ручной дуговой сварки . . . . .                 | 87         |
| 3.3. Другие современные виды сварки . . . . .                           | 89         |
| 3.3.1. Плазменная сварка и резка . . . . .                              | 89         |
| 3.3.2. Газовая сварка и резка . . . . .                                 | 91         |
| 3.3.3. Электроконтактная сварка . . . . .                               | 97         |
| 3.3.4. Прессовая (холодная) сварка . . . . .                            | 100        |
| 3.3.5. Диффузионная сварка в вакууме . . . . .                          | 100        |
| 3.3.6. Сварка трением . . . . .   | 100        |
| 3.3.7. Электрошлаковая сварка . . . . .                                 | 101        |
| 3.3.8. Лучевые методы сварки и резки . . . . .                          | 103        |
| 3.3.9. Ультразвуковая сварка . . . . .                                  | 104        |
| 3.3.10. Термитная сварка . . . . .                                      | 105        |
| <b>Глава 4. Контроль качества сварки . . . . .</b>                      | <b>106</b> |
| 4.1. Основные сварочные дефекты . . . . .                               | 106        |
| 4.2. Методы контроля качества сварки . . . . .                          | 109        |
| <b>Глава 5. Безопасность труда при сварке . . . . .</b>                 | <b>114</b> |
| <b>Глава 6. Понятие об аттестациях . . . . .</b>                        | <b>117</b> |
| <b>Рекомендуемая литература . . . . .</b>                               | <b>120</b> |
| <b>Приложение. Оказание первой медицинской помощи . . . . .</b>         | <b>121</b> |

## ВВЕДЕНИЕ

---

Значение сварки как весьма эффективного, экономичного и надежного способа соединения деталей велико для всех видов производств. Но если, например, в машиностроении при сборке широко применяются и другие способы соединения деталей, то при сооружении трубопроводов, резервуаров, других металлоконструкций она является основным методом, на сварку здесь уходит большая часть операционного времени при строительстве и она занимает значительную долю в стоимости сооружения объектов.

Кроме того, из-за значительных экономических и экологических последствий аварий требования к качеству сварки объектов трубопроводного транспорта весьма высоки и уступают, возможно, только требованиям к качеству сварки деталей аэрокосмических объектов (при несопоставимо меньших объемах сварки последних).

В настоящее время считается перспективным применение пластиковых и композитных, металлополимерных труб. Однако основным способом соединения пластиковых труб также является сварка, хотя и по несколько другим технологиям. С металлополимерными дело обстоит несколько сложнее, и недостаточно разработанные методы их соединения — как раз одна из причин, сдерживающих их распространение.

Чтобы при проведении сварочных работ не допускать брака, надо, разумеется, хорошо знать нормативно-техническую документацию, строго следовать утвержденной технологии. Однако много легче разбираться в этой документации осознанно, зная теоретические основы сварки. Знание теории помогает находить инженерные решения в нестандартных ситуациях. Наконец, кто-то должен и саму технологию сварки разрабатывать!

При реконструкции и особенно при строительстве новых трубопроводов в настоящее время используется много технологических новинок, внедряются новые сварочные процессы, оборудование и материалы. Знакомство с альтернативными способами сварки, в том числе и с применяемыми в смежных отраслях промышленности, значительно облегчает и ускоряет освоение новых сварочных технологий.

Изучению основ сварки и посвящено данное пособие.

# Глава 1

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

---

---

### 1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНЯТИЯ «СВАРКА»

Наиболее общее определение понятия сварки: *сварка* — это процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между материалами соединяемых деталей, осуществляемый за счет введения того или иного вида энергии в зону сварки.

Склеивание также является созданием неразъемного соединения посредством межатомных связей, но оно, как правило, может осуществляться без дополнительного введения энергии в зону склейки и потому не подпадает под это определение.

В то же время *пайка* — процесс создания неразъемного соединения посредством межатомных связей при введении в зону соединения более легкоплавкого вещества — припоя, подпадает и, таким образом, в самом общем случае может рассматриваться как разновидность сварки.

Основное отличие собственно сварки от пайки состоит в том, что при сварке происходит плавление, или пластическое деформирование основного металла, а при пайке нет. В то же время процессы эти все же достаточно близки, и один и тот же процесс при определенных условиях может рассматриваться как сварка, а в других — как пайка.

Так, пайка стали медью или латунию будет называться высокотемпературной пайкой. А соединение при тех же условиях медных деталей, на том же самом оборудовании, при примерно тех же режимах и сварочных материалах, будет уже сваркой.

Существуют и другие виды неразъемных соединений, когда путем придания деталям специальной формы обеспечивается их соединение по чисто геометрическим причинам (развальцовка, отбортовка, раздача, соединение заклепками). Возможно соединение за счет сил трения (прессовая посадка, которая из-за сложности демонтажа обычно рассматривается как неразъемная). Такие виды неразъемных соединений уже не могут, разумеется, считаться сваркой. Сварка и неразъемные соединения, конечно, не синонимы.

## 1.2. ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ СВАРКИ

Атомы, ионы или молекулы, образующие твердые тела, находятся на определенном расстоянии друг от друга и связаны между собой той или иной химической связью: металлической, ионной, ковалентной, Ван-дер-Ваальса.

Все вышеперечисленные связи, за исключением ковалентной, не обладают свойством насыщения, и потому, сблизив частицы двух кусков материала на межатомные расстояния, можно ожидать появления межатомных связей между частицами этих двух тел и, таким образом, соединения этих двух тел в одно, т.е. осуществления сварки (вещества с ковалентными связями обычно не свариваются).

Однако даже с чисто теоретической точки зрения, процесс осложняется тем, что частицы на поверхности имеют повышенную энергию, что является следствием некомпенсированности здесь межмолекулярных или атомарных сил (та же причина, что приводит к появлению поверхностного натяжения). При сварке этот энергетический барьер надо преодолеть.

Более того, поверхности могут быть и чаще всего бывают в той или иной мере загрязнены, на них практически всегда присутствуют оксидные пленки, быстро образующиеся на воздухе на очищенных поверхностях. Молекулы газов воздуха или даже защитных газов, абсорбируясь на поверхностях, также препятствуют сближению частиц соединяемых материалов, что затрудняет сварку намного больше, чем только наличие поверхностного потенциального барьера. К тому же поверхности соединяемых деталей не абсолютно ровные, и поэтому контакт имеет место только на отдельных небольших участках.

Все эти препятствия могут быть преодолены или, по крайней мере, ослаблены оплавлением поверхности или сильным пластическим деформированием. Соответственно, говорят о сварке плавлением и сварке деформированием, или термической, механической и термомеханической сварке (объединяющей нагрев и деформирование).

## 1.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ СВАРКИ

Существует несколько классификаций видов сварки. Самая общая приведена чуть выше (сварка плавлением и сварка деформированием). В пределах этих классов виды сварки различают по виду

подводимой энергии, а подклассы формируют по технологическим особенностям.

К *термической сварке (сварке плавлением)* относятся: дуговая, газовая, индукционная, термитная, электрошлаковая, литейная, плазменная, электронно-лучевая, фотонно-лучевая (лазерная и световая) (последние три часто объединяют в группу под названием «сварка концентрированными потоками энергии» (КПЭ), иногда к этой группе относят и плазменную).

К *механической сварке (сварке деформированием)* относятся: холодная (или прессовая), трением, ультразвуковая, взрывом, вакуумная.

К *термомеханической* сварке относятся: электроконтактная, газопрессовая, диффузионная.

Существуют и другие виды сварки.

По *виду* получающегося *шва* сварку подразделяют на точечную и шовную. По *степени механизации* — на ручную, полуавтоматическую и автоматическую. По *виду защиты* сварного шва — на сварку на воздухе, сварку в защитных газах, сварку под флюсом и сварку в вакууме. По *расположению* выполняемого *сварного шва* в пространстве — на нижнюю, вертикальную или горизонтальную и потолочную. Существует много и других подклассов, часто применяемых только для определенных методов сварки или для определенных производств (так, в трубопроводном строительстве применяют термины «сварка поворотных и неповоротных стыков»). Некоторые из этих подклассов мы рассмотрим при изучении конкретных видов сварки.

#### 1.4. РЕЗКА И РАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА

Перед тем как произвести сварку, часто требуется обрезать ту или иную деталь, лист, трубу, сделать в них вырез.

Резка классифицируется, в общем, так же, как и сварка: термическая резка, механическая и термомеханическая. Оборудование для термической резки конструктивно очень сходно со сварочным. Зачастую это одно и то же оборудование, работающее в разных режимах. Поэтому термическую резку обычно рассматривают в курсе сварки.

К *термической резке* относят газовую резку, воздушно-дуговую, резку концентрированными потоками энергии.

*Механическую резку* подразделяют на резку лезвийным и абразивным инструментом. Первую группу образует: резка дисковыми пилами или фрезами, резка механическими пилами, резка резцами, закрепленными в специальных головках, обрезка отрезными резцами (требуется вращение детали), резка ручными пилами по металлу.

Абразивную резку чаще всего осуществляют относительно тонкими (2...5, чаще 3...4 мм толщины) абразивными кругами с упруго-пластичной связкой и армированными провололочной сеткой (так называемые «вулканитовые» круги). Очень большие объекты (например, крепостные стены при выполнении в них уличных проходов) режут перематыванием и протягиванием троса, под который подсыпают абразивный порошок. Высококачественную резку без нагрева (например, при разделке образцов для исследования) осуществляют дисками из мягкого металла, смачиваемыми раствором взвеси абразива.

Весьма перспективна гидроабразивная резка, при которой резка производится струей воды под большим давлением, в которую для увеличения производительности добавляют абразивный порошок. Возможна резка без добавления абразива, в последнем случае качество реза повышается, но производительность и максимальная толщина реза снижаются. Давления при гидроабразивной резке превышают 200 МПа.

При резке твердых трудно обрабатываемых материалов достаточно широко применяется так называемая анодно-абразивная резка (инструмент — чаще всего диск из мягкого металла, на который подается напряжение; резка осуществляется в растворе электролита за счет анодного растворения обрабатываемого металла, при этом продукты коррозии удаляются механически вращающимся электродом-диском).

При резке труб режущее устройство с режущим инструментом (абразивный диск, дисковая фреза или горелка) может совершать планетарное движение вокруг детали. Это наиболее распространенная схема при обрезке труб средних и больших диаметров.

Резка может осуществляться при маятниковом (по дуге) перемещении отрезной головки (при резке труб малых и средних диаметров), а также при возвратно-поступательном движении инструмента (для малых диаметров). Применяется также схема с неподвижным инструментом и вращением самой трубы.

## Глава 2

### ТЕОРИЯ СВАРКИ

---

---

#### 2.1. ОСНОВЫ ТЕПЛОФИЗИКИ СВАРКИ

##### 2.1.1. Баланс энергии при сварке, понятие об эффективном и термическом КПД

В самом общем случае, вне зависимости от типа сварки, баланс энергии можно представить следующим образом.

Какое-то количество энергии мы должны затратить на работу сварочной установки. Чаще всего эту энергию мы получаем из электрической сети, однако в общем случае это может быть и энергия сгорания химического топлива, механическая энергия, или, к примеру, солнечная энергия. Эта энергия обычно называется установочной энергией технологического оборудования (сварочной установки) и обозначается  $Q_{\text{уст}}$ .

На выходе установки мы будем иметь энергию  $Q_{\text{вых}}$ . Так как неизбежно имеются потери, то  $Q_{\text{вых}} < Q_{\text{уст}}$ .

Большая часть  $Q_{\text{вых}}$  поступит к сварочному инструменту  $Q_{\text{св}}$ . Однако потери, хотя как правило и небольшие, будут и на этом участке. Таким образом, КПД сварочной установки составит:

$$\eta_{\text{уст}} = Q_{\text{св}} / Q_{\text{уст}}$$

Однако не вся энергия  $Q_{\text{св}}$  будет использована непосредственно на образование сварного шва. И даже не вся поступит к свариваемым деталям.

Действительно, часть энергии будет рассеяна на пути от источника энергии (инструмента) к свариваемым деталям. Это будет происходить за счет омического сопротивления в сварочных электродах при дуговой сварке, рассеяния и поглощения энергии в парогазовом канале при лучевых методах сварки и т.п. Энергия, выделяющаяся в дуге, также не вся попадает в изделия, часть ее будет рассеяна в окружающее пространство, часть будет отражена от поверхности изделия (для дуговой сварки эти потери не слишком велики, но, скажем, для лазерной сварки они значительны). Так или

иначе, изделием будет поглощена только часть энергии, называемая эффективной энергией  $Q_{\text{и}}$ . Процесс передачи энергии в изделие будет характеризоваться определенным КПД, который принято называть **эффективным КПД**:

$$\eta_{\text{и}} = Q_{\text{и}}/Q_{\text{св}},$$

или в виде баланса мощностей:

$$\eta_{\text{и}} = q_{\text{и}}/q_{\text{св}}.$$

Типичные значения  $\eta_{\text{и}}$  следующие: открытая угольная дуга и дуга в аргоне 0,5...0,65; сварка плавящимися штучными электродами 0,7...0,85; сварка под флюсом 0,85...0,93.

Если мы осуществляем сварку плавлением, то для этого необходимо расплавить какое-то количество вещества, на что потребуются потратить  $Q_{\text{ш}}$ . При остывании расплав застынет, образуя сварной шов.

Очевидно однако, что далеко не вся энергия, даже уже поглощенная изделием, пойдет на образование сварочной ванны. Значительное ее количество будет за счет теплопроводности рассасываться в прилегающие холодные участки свариваемых деталей, бесполезно их нагревая. Какая-то часть энергии переизлучается поверхностью изделия, какая-то часть уносится с продуктами разрушения (металлический пар, плазма, плавление шлака и т.п.). Происходит также охлаждение окружающей средой (воздухом, защитными газами и т.п.). В общем случае эти потоки энергии, как правило, невелики и в сумме не превышают 10%, но потери на теплопроводность обычно значительны.

Отношение энергии, затрачиваемой на плавление материала в сварочной ванне, к поглощенной изделием энергии называют **термическим КПД**:

$$\eta_{\text{т}} = Q_{\text{ш}}/Q_{\text{и}}.$$

Термический КПД характеризует эффективность использования поглощенной изделием энергии. В виде баланса мощностей:

$$\eta_{\text{т}} = q_{\text{ш}}/q_{\text{и}}.$$

Для точечного источника, нагревающего полупространство,  $\eta_{\text{т}}$  возрастает с ростом безразмерного критерия  $\epsilon_3 = q_{\text{св}}^2 / (\alpha^2 \rho H)$  ( $\alpha$  —

коэффициент теплоотдачи;  $\rho$  — плотность;  $H$  — энтальпия) и при  $\varepsilon_3 \rightarrow \infty$   $\eta_T \rightarrow 0,368$ . Для линейного источника в пластине  $\eta_T$  возрастает с ростом критерия  $\varepsilon_2 = q/(\delta\alpha\rho H)$  до  $\sqrt{2/\pi e} = 0,484$  (0,368 и 0,484 — это теоретически максимальные для этих условий значения).

Общий КПД сварочного процесса равен:

$$\eta = \eta_{уст} \cdot \eta_{и} \cdot \eta_T$$

Составляющие общего КПД зависят от вида и режима сварки и могут изменяться в очень широких пределах. Типовые значения при сварке листов приведены в табл. 1.

### 1. Типовые значения частных КПД для различных способов сварки

| Способ сварки      | $\eta_{уст}$ | $\eta_{и}$ | $\eta_T$    | $\eta$        |
|--------------------|--------------|------------|-------------|---------------|
| Аргонно-дуговая    | 0,6...0,9    | 0,4...0,7  | 0,18...0,22 | 0,04...0,14   |
| Плазменная         | 0,6...0,9    | 0,5...0,75 | 0,2...0,3   | 0,06...0,2    |
| Электронно-лучевая | 0,1...0,3    | 0,7...0,9  | 0,2...0,48  | 0,014...0,13  |
| Лазерная           | 0,01...0,2   | 0,2...0,9  | 0,2...0,48  | 0,0004...0,08 |

Возникает вопрос: зачем использовать такое дорогое оборудование, как мощные технологические лазеры, электронно-лучевые источники и т.п., если их энергетическая эффективность ниже, чем у дешевого?

Причины — в более «качественной» энергии на выходе таких установок, обеспечивающей гибкость в управлении и более легкую автоматизацию сварочных процессов, возможность сваривать трудно-свариваемые и/или миниатюрные детали и за счет более острой фокусировки получать большие температуры нагрева.

Кроме термического КПД затраты энергии характеризуют погонной энергией сварки — количеством теплоты, вводимой в изделие и отнесенной к единице длины шва.

### 2.1.2. Теплосодержание сварочной ванны

При анализе тепловых процессов важно знать теплосодержание сварочной ванны, т.е.  $Q_{\text{ш}}$ . Зная размеры сварочной ванны и теплофизические свойства материала, теплосодержание несложно определить:

$$Q_{\text{ш}} = V\rho H,$$

где  $V$  — объем сварочной ванны,  $\rho$  — плотность,  $H$  — энтальпия или удельное теплосодержание:  $H = c \Delta T + l_m + \sum l_i$ , здесь  $c$  — теплоемкость;  $\Delta T$  — температура нагрева материала сварочной ванны;  $l_m$  и  $l_i$  — удельные теплоты соответственно плавления и фазовых превращений. В большинстве случаев слагаемым  $\sum l_i$ , а при сварке сталей и  $l_m$  можно пренебречь. Наибольшую же погрешность при подобных расчетах вносит зависимость теплоемкости от температуры.

Вышеприведенную формулу можно применять для импульсной точечной сварки, но для непрерывной сварки и протяженных швов ею пользоваться неудобно, поэтому обычно переходят к мощности:

$$q_{\text{ш}} = \eta_{\text{и}}\eta_{\text{т}}IU = v_{\text{св}}F\rho H,$$

здесь  $q_{\text{ш}}$  — мощность, затрачиваемая на плавление;  $IU$  — мощность дуги (произведение тока дуги и напряжения на дуге),  $v_{\text{св}}$  — скорость сварки,  $F$  — поперечная площадь сечения шва.

### 2.1.3. Теплопередача при сварке

Как известно, существует три механизма передача теплоты: за счет теплопроводности, конвекции и лучеиспускания, причем в твердых телах работает только первый, в жидкостях — первый и второй, а в газах — все три.

При сварке за счет теплопроводности происходит рассасывание теплоты из сварочной ванны в окружающие участки, за счет лучеиспускания и конвекции — охлаждение поверхности. Лучеиспускание — основная причина рассеяния энергии дуги в окружающее пространство. Рассмотрим кратко все эти три способа передачи тепла.

**Закон теплопроводности (закон Фурье).** Пусть теплота передается по длинному стержню, причем в поперечном направлении потока теплоты нет (т.е. рассматриваем задачу в одномерной постановке).

Количество теплоты  $dQ$ , протекающее за время  $dt$  через поперечное сечение площадью  $F$  при градиенте температур  $dT/dx$ , будет подчиняться следующей зависимости, называемой законом Фурье:

$$dQ_x = \lambda(-dT/dx)Fdt.$$

Коэффициент пропорциональности  $\lambda$  называют *коэффициентом теплопроводности*.

Переходя от тепловых потоков к соответствующим изменениям температур, можно получить основное дифференциальное уравнение теплопроводности для стержня:

$$\partial T/\partial t = [\lambda/c\rho] (\partial^2 T/\partial x^2).$$

Для трехмерного случая:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \alpha \nabla^2 T,$$

где  $\alpha = \lambda/(c\rho)$  — коэффициент температуропроводности;  $\nabla$  — оператор Лапласа.

Решение подобных уравнений представляет определенные математические трудности. Более того, теплофизические константы материалов оказываются зависящими от температуры, что приводит к нелинейности дифференциальных уравнений. Нелинейные дифференциальные уравнения поддаются решению только в некоторых отдельных частных случаях. Это приводит к необходимости упрощать постановку задачи или решать задачу численно. В настоящее время возможности решения сложных тепловых задач значительно возросли за счет использования компьютерной техники.

**Конвективный теплообмен.** Приближенно тепловой поток  $q_k$  с единицы поверхности за единицу времени при конвективном теплообмене определяется по правилу Ньютона:

$$q_k = \alpha_k \Delta T,$$

где  $\alpha_k$  — коэффициент теплоотдачи;  $\Delta T$  — разность температур между телом и средой. Коэффициент теплоотдачи зависит от многих факторов, в частности изменяется с температурой, что вносит нелинейность в уравнения.

**Лучистый теплообмен.** Согласно закону Стефана-Больцмана поток излучения тела с единицы поверхности пропорционален четвертой степени его абсолютной температуры:

$$q_i = \alpha \sigma T^4,$$

где  $\sigma$  — коэффициент Стефана-Больцмана,  $\alpha$  — излучательная способность тела. Для шероховатых окисленных стальных поверхностей  $\alpha = 0,6...0,95$ , а, скажем, для полированных алюминиевых  $\alpha = 0,05...0,2$ .

До температур порядка 400...500 К основной вклад в поверхностную теплоотдачу вносит конвекция, при более высоких температурах — лучеиспускание.

Однако при сварке массивных тел в сумме они, как правило, занимают не более 10% в общем балансе потока энергий, и ими часто пренебрегают. Напротив, при сварке тонких пластин поверхностное охлаждение желательно учитывать, так как его относительная доля в этом случае будет значительнее.

#### 2.1.4. Упрощения и постановка задачи при проведении реальных расчетов

При решении тепловых задач при сварке редко анализируют тепловые поля в реальных деталях, имеющих сложную форму. Чаще всего задачи решают для следующих идеализированных тел:

- **полубесконечное тело** (бесконечное тело, ограниченное одной плоскостью) принимают для достаточно массивных изделий;
- **бесконечная пластина** (бесконечное тело, ограниченное двумя параллельными плоскостями) — если изменением температуры по толщине пластины можно пренебречь, то такое тело называют тонкой пластиной;
- **стержень** (бесконечный сплошной цилиндр, изменением температуры в поперечном направлении которого можно пренебречь) — задача решается в одномерном приближении.

Источник нагрева может иметь разное распределение плотности мощности по поверхности и разное изменение мгновенной мощности во времени. Однако в расчетах источник обычно принимают за точечный, линейный либо за поверхностный с равномерным по площади или Гауссовым распределением плотности мощности. Во

временных координатах источник чаще всего представляют либо как мгновенный, либо с постоянным уровнем мощности.

Теплофизические коэффициенты обычно принимают не зависящими от температуры, что, пожалуй, вносит наибольшие погрешности, но значительно упрощает расчеты. В такой постановке во многих случаях уже удастся получить аналитическое решение уравнения теплопроводности, и в специальной литературе можно найти решения задач для многих частных сочетаний вышеприведенных допущений.

### **2.1.5. Влияние режимов сварки на температурные поля**

Примеры расчетных изотерм в стальной пластине приведены на рис. 1. Нагрев стальной пластины производился точечным источником теплоты, поверхностное охлаждение не учитывалось.

Уменьшение длины и ширины изотерм прямо пропорционально увеличению скорости сварки, а при изменении мощности соответствующие размеры изменяются быстрее, причем длина меняется более заметно, чем ширина. Одновременное увеличение скорости и мощности сварки приводит к увеличению в основном длины изотерм, их расширение в этом случае незначительно.

Влияние коэффициента теплопроводности на температурное поле показано на рис. 2 (условия те же, что и на рис. 1). Видно, что увеличение теплопроводности приводит к уменьшению температурных градиентов и «размыванию» изотерм.

### **2.1.6. Быстродвижущиеся тепловые источники**

Пусть погонная энергия и скорость сварки увеличиваются, но их отношение остается постоянным. При этом форма температурного поля в подвижных координатах будет, естественно, меняться. Однако изменяясь, она будет стремиться к некоей предельной форме, после достижения которой дальнейшие изменения будут уже пренебрежимо малы. Тепловые источники, движущиеся со скоростями достижения этой предельной формы и большими, называют быстродвижущимися.

При КПЭ — сварке остросфокусированными источниками — реальные тепловые поля весьма близки к быстродвижущимся. Поля дуговых источников несколько дальше отстоят от последних.

Но поскольку такая постановка задачи значительно упрощает решение, она часто применяется и для дуговой сварки.

Так, ширина зоны с температурой на  $\Delta T$  выше исходной при нагреве полубесконечного тела точечным быстро движущимся источником (и при пренебрежении конвективным и лучистым охлаждением) оказывается равной:

$$b = \sqrt{\frac{8q}{\pi e v_{\text{св}} c \rho \Delta T}},$$

где  $q$  — эффективная мощность источника теплоты;  $v_{\text{св}}$  — скорость перемещения источника;  $c$  и  $\rho$  — соответственно теплоемкость и плотность материала изделия. Таким образом, задавая соответствующим значением  $\Delta T$ , можно оценить ширину шва или ширину, например, зоны отпуска.

Для нагрева пластины соответствующая зависимость будет иметь вид:

$$b = \frac{q \sqrt{\frac{2}{\pi e}}}{v_{\text{св}} c \rho \delta \Delta T},$$

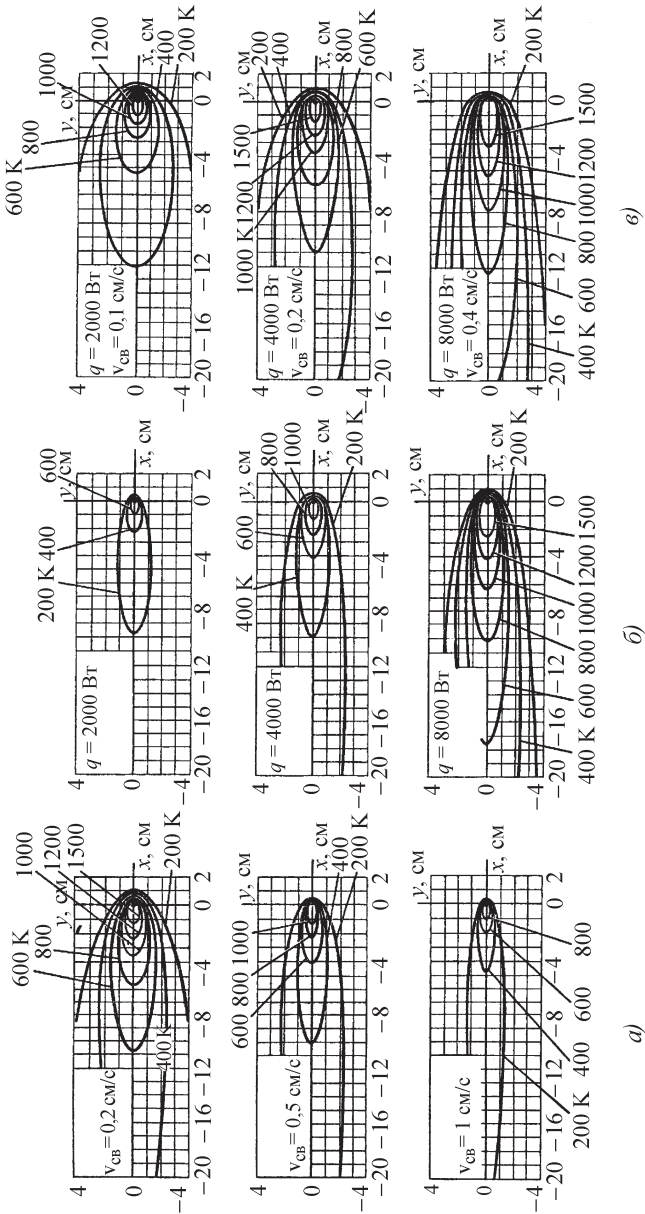
где  $\delta$  — толщина пластины.

### 2.1.7. Понятие термического цикла

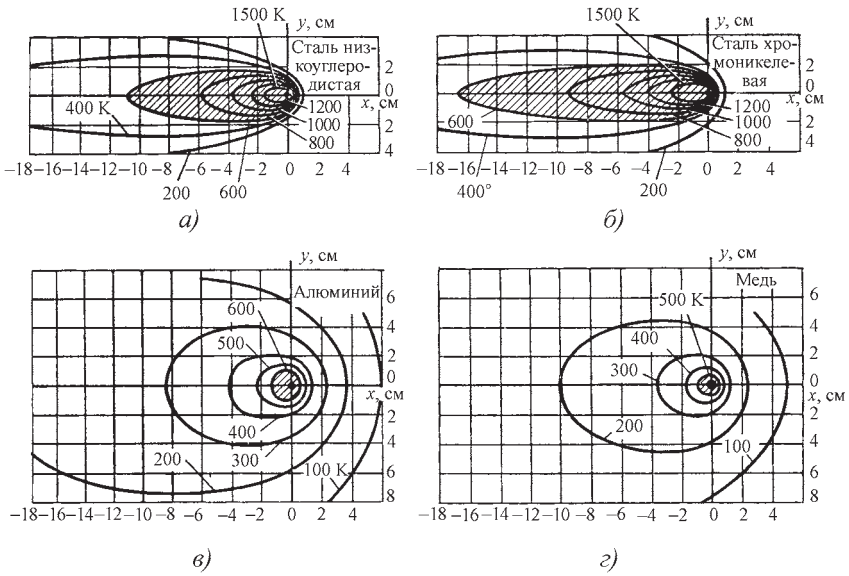
В процессе сварки источник нагрева перемещается, и вместе с ним перемещается температурное поле. Распределения температур на рис. 1, 2 были даны в координатах, связанных с источником нагрева, что очень удобно при решении тепловых задач, так как в случае предельного состояния приводит к стационарному распределению изотерм.

Однако для решения материаловедческих задач важнее знать температурную историю конкретных физических точек материала. В этом случае система координат должна быть связана с изделием.

Понятно, что температуры в изделии будут изменяться во времени: сначала в данной точке будет происходить нагрев, потом охлаж-



**Рис. 1.** Влияние скорости и мощности теплового источника на температурные поля при изменении:  
 $a$  — скорости сварки;  $b$  — мощности источника теплоты;  $v$  — мощности и скорости при постоянном отношении  $q/v_{CB}$



**Рис. 2. Влияние теплопроводности на распределение температуры по поверхности**

дение. Такая температурная история областей тела называется термическим циклом.

Температура в термическом цикле изменяется по сложному закону, но основными параметрами цикла являются:

- максимальная температура цикла;
- время пребывания точки выше заданной температуры;
- скорости нагрева и охлаждения при определенных (заданных) температурах.

Эти характеристики зависят от режимов сварки, теплофизических параметров материала, формы тела, условий его охлаждения и предварительного подогрева.

В момент достижения максимальной температуры первая производная по времени становится равной нулю. Хотя в общем случае максимальную температуру аналитически выразить не

удаётся, для быстродвижущегося источника приходим к очень простому уравнению:

для полубесконечного тела без учета поверхностного охлаждения

$$T_{\max} - T_0 = \frac{2q}{\pi v_{\text{св}} c \rho r_0^2},$$

где  $r_0^2 = y_0^2 + z_0^2$ ;

для пластины с учетом поверхностного охлаждения:

$$T_{\max} - T_0 = \frac{2q}{\sqrt{2\pi} v_{\text{св}} c \rho \delta y_0} \left( 1 - \frac{b y_0}{2a} \right),$$

где  $y_0$  — расстояние от данной точки до оси шва;  $b$  — коэффициент температуроподдачи,  $b = 2\alpha/(c\rho\delta)$ .

Мгновенная скорость охлаждения является первой производной температуры по времени:  $\omega = \delta T/\delta t$ . Тогда для случая нагревания быстродвижущимся источником:

полубесконечного тела:

$$\omega = -2\pi\lambda \frac{(T - T_0)^2}{q / v_{\text{св}}};$$

пластины:

$$\omega = -2\pi\lambda c \rho \frac{(T - T_0)^3}{[q / (v_{\text{св}} \delta)]^2},$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $T_0$  — температура изделия вне зоны сварочного нагрева (к ней стремится температура при охлаждении после сварки).

Зная эти скорости, например в температурной области мартенситного превращения, можно судить о том, будет происходить подкалка или нет.

Очевидно, что температура  $T_0$  будет мало сказываться на скоростях охлаждения в высокотемпературной области, но весьма сильно — при низких температурах. Таким образом, регулируя температуру сопутствующего подогрева (т.е.  $T_0$ ), можно регулировать скорость охлаждения и избегать подкалки.

### 2.1.8. Термический цикл при многопроходной сварке

При непрерывной многопроходной сварке охлаждение происходит медленнее за счет взаимного подогрева слоев (если, однако, сварка была прервана и все остыло, то при ее возобновлении может оказаться, что скорость охлаждения очередного слоя даже выше, чем при однопроходной сварке).

Многопроходная сварка может осуществляться длинными или короткими участками. В первом случае изменение тепловых условий обычно учитывается через эмпирические поправочные коэффициенты к погонной энергии и толщине стенки.

При сварке короткими участками их длину стараются выбирать такой, чтобы к моменту начала подогрева вторым слоем температура первого не успевала упасть ниже определенного значения (например, температуры начала мартенситного превращения). Можно показать, что это условие выполняется при:

$$l \leq \frac{k_3^2 k_r q^2}{4\pi\lambda c\rho\delta^2 v_{св} (T_b - T_n)^2},$$

где  $T_n$ ,  $T_b$  — соответственно начальная температура и температура, до которой может успеть охладиться проход;  $k_r$  — коэффициент времени горения дуги (для автоматической сварки  $k_r = 1$ , для ручной дуговой  $k_r = 0,6 \dots 0,8$ );  $k_3$  — поправочный коэффициент, найденный опытным путем (для соединения встык он равен 1,5 и для соединений в тавр и внахлестку — 0,9).

#### *Примеры решения теплофизических задач*

**Задача 1.** На поверхность массивного тела наплавляют валик. Определить ширину зоны, нагревающуюся выше температуры  $T = 625$  °С.

Режим наплавки: эффективная мощность источника теплоты  $q = 6$  кВт, скорость перемещения источника  $v_{св} = 9$  м/ч, теплофизический параметр (объемная удельная теплоемкость)  $c\rho = 4,9 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup> · К), начальная температура тела  $T_n = 25$  °С.

**Решение**

Воспользуемся формулой для быстродвижущегося источника:

$$b = \sqrt{\frac{8q}{\pi e v_{св} c\rho \Delta T}},$$

где  $b$  — ширина зоны, нагретой до температуры на  $\Delta T$  выше исходной.

Скорость перемещения источника нагрева  $v_{cb} = 9 \text{ м/ч} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ ,  $\Delta T = 625 - 25 = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ . Подставляя эти значения в уравнение, получаем:  $b = 0,0276 \text{ м} = 27,6 \text{ мм}$ .

Решение этой задачи численным методом дает ширину зоны 25,6 мм. Таким образом, использование приближения быстродвижущегося источника приводит к ошибке около 8 %, что в большинстве случаев можно считать приемлемой точностью.

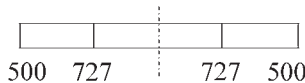
**Задача 2.** Листы толщиной  $\delta = 8 \text{ мм}$  сваривают за один проход дуговой сваркой при токе  $I = 300 \text{ А}$ , напряжении дуги  $U = 34 \text{ В}$  и скорости  $v_{cb} = 18 \text{ м/ч}$ . Эффективный КПД сварки составлял 0,8. Объемная удельная теплоемкость стали  $c_p = 5 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}$ , исходная температура листов  $T_{н} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить ширину зоны отпуска, которая находится между изотермами 500 и 727  $^\circ\text{C}$ .

**Решение**

Воспользуемся формулой для нагрева пластин быстродвижущимся источником:

$$b = \frac{q \sqrt{\frac{2}{\pi e}}}{v_{cb} c_p \delta \Delta T}.$$

Очевидно, что ширина зоны отпуска с каждой стороны от шва будет равна  $(b_{500} - b_{727})/2$  (здесь  $b_{500}$  и  $b_{727}$  — расстояния между изотермами 500 и 727  $^\circ\text{C}$  соответственно, см. рисунок).



Находим эффективную мощность источника теплоты:  $q = \eta_{н} UI = 0,8 \cdot 34 \times \times 300 = 8160 \text{ Вт}$ . При  $v_{cb} = 18 \text{ м/ч} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ , толщине листа  $\delta = 8 \text{ мм} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $\Delta T_{500}$  и  $\Delta T_{727}$  будут равны 500 и 727  $^\circ\text{C}$  соответственно.

Подставляя, получим  $b_{500} = 0,0394 \text{ м} = 39,5 \text{ мм}$ ,  $b_{727} = 0,0270 \text{ м} = 27,0 \text{ мм}$ . Таким образом, ширина зоны отпуска примерно будет равна 6,25 мм.

**Задача 3.** Сваривается массивная корпусная стальная деталь ( $\lambda = 38 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ). Режимы сварки:  $I = 400 \text{ А}$ ,  $U = 38 \text{ В}$ ,  $v_{cb} = 18 \text{ м/ч}$ , эффективный КПД 0,8. Температура окружающей среды 25  $^\circ\text{C}$ .

Требуется определить мгновенную скорость охлаждения металла при текущей температуре 600  $^\circ\text{C}$  (температуре минимальной устойчивости

аустенита), и в случае, если она окажется выше  $25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , определить температуру сопутствующего подогрева, обеспечивающего указанную скорость охлаждения.

### Решение

Будем решать задачу в приближении быстродвижущихся источников теплоты. Так как производится сварка массивной детали, ее можно принять за полупространство. Для этого случая имеет место следующая зависимость:

$$\omega = -2\pi\lambda \frac{(T - T_0)^2}{q / v_{\text{св}}},$$

где  $T_0$  — конечная равновесная температура детали (пренебрегая нагревом всей детали при сварке, равна температуре окружающей среды либо температуре сопутствующего подогрева в зависимости от отсутствия или наличия последнего).

Находим эффективную мощность источника теплоты:  $q = \eta UI = 0,8 \cdot 38 \times \times 400 = 12\,160$  Вт. Скорость сварки  $v_{\text{св}} = 18$  м/ч =  $5 \cdot 10^{-3}$  м/с. Отсюда скорость охлаждения при текущей температуре  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  будет составлять  $-32,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  (знак «минус» показывает, что имеет место охлаждение), т.е. превышает критическую ( $25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ), и, следовательно, необходим сопутствующий подогрев.

Выразим  $T_0$  из вышеприведенного уравнения:

$$T_0 = T - \sqrt{\frac{\omega_{\text{кр}} q}{-2\pi\lambda v_{\text{св}}}}.$$

Подставив численные значения, получим, что температура сопутствующего подогрева, обеспечивающего заданную скорость охлаждения, составит  $95,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $368,4\text{ K}$ ). С некоторым запасом принимаем минимальную температуру сопутствующего подогрева в  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Задача 4.** Пластины из стали 40Х толщиной  $\delta = 16$  мм свариваются многослойным швом встык. Режимы сварки:  $I = 170$  А,  $U = 25$  В,  $v_{\text{св}} = 7,2$  м/ч,  $\eta_{\text{и}} = 0,8$ . Коэффициент теплопроводности свариваемой стали  $\lambda = 38$  Вт/(м · К), объемная удельная теплоемкость стали  $cr = 5 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup> · К).

Определить максимальную длину участка при сварке короткими участками «горкой», если температура начала мартенситного превращения порядка  $M_{\text{н}} = 325\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура деталей перед сваркой  $T_{\text{и}} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### Решение

Смысл сварки короткими участками в том, чтобы начинать вышележащий новый проход до того, как предшествующий охладится до температу-

ры начала мартенситного превращения. В этом случае нагрев от нового прохода предотвращает возможную подкалку предыдущего.

При сварке без перерыва и с постоянной скоростью для соблюдения данного условия длина свариваемых коротких участков не должна превышать

$$l \leq \frac{k_3^2 k_r q^2}{4\pi\lambda c\rho\delta^2 v_{св} (T_b - T_n)^2}.$$

Находим эффективную мощность сварки:  $q = \eta_{и} UI = 0,8 \cdot 25 \cdot 170 = 3400$  Вт. Толщина пластин  $\delta = 16$  мм  $= 1,6 \cdot 10^{-2}$  м,  $v_{св} = 7,2$  м/ч  $= 2 \cdot 10^{-3}$  м/с. Так как сварка ручная, принимаем коэффициент горения дуги  $k_r = 0,75$ . Поправочный коэффициент для стыкового соединения  $k_3 = 1,5$ . Температура  $T_b$ , до которой допускается охлаждаться нижнему слою, равна температуре начала мартенситного превращения, т.е.  $325$  °С.

Подставляя численные значения в вышеприведенное неравенство, получаем:  $l \leq 0,177$  м. С некоторым запасом принимаем  $l = 0,150$  м.

Таким образом, проводя сварку участками, не превышающими по длине 150 мм, мы предупреждаем возможность подкалки шва.

## 2.2. СВОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

Электрическая дуга в настоящее время является, видимо, самым распространенным источником энергии, используемым для сварки. Рассмотрим основные ее особенности.

### 2.2.1. Основы физики дугового разряда

Создадим разность потенциалов на двух электродах (одним из них будет свариваемое изделие). Приблизим электрод к изделию.

Сопротивление воздуха достаточно большое, и при нормальных условиях через зазор электрод — изделие будет течь очень небольшой ток, совершенно не достаточный для возникновения дугового разряда. Повысить ток, повышая напряжение на электроде, нельзя по требованиям безопасности (напряжение пробоя 1 см сухого воздуха при нормальных условиях порядка 30 кВ).

Обычно ионизацию воздушного промежутка осуществляют сведением электродов до соприкосновения и быстрым их разведением. В момент контакта возникает большой ток короткого замыкания, который за счет джоулева тепла расплавляет контактирующие

выступы. При разведении электродов расплавленный мостик растягивается, утончается и из-за резко возрастающей в нем плотности тока испаряется и ионизируется. Ионы и электроны в зазоре ускоряются электрическим полем. Начинается характерный электрический разряд. Такие разряды, характеризующиеся большими токами и малыми напряжениями, называются дуговыми.

Существуют и другие способы инициации дугового разряда: ионизация мощным потоком ультрафиолетового излучения, созданием тлеющего разряда высоковольтным высокочастотным генератором (напряжением до 2 кВ и частотой 150...260 кГц). Однако подобные способы, как правило, применяются только в цеховых условиях и в специальных случаях.

Сила тока разряда зависит от степени ионизации и напряженности поля в зазоре. Выделяющаяся теплота необходима для термоэлектронной эмиссии и поддержания установившейся степени ионизации. Если выделяющейся теплоты достаточно, то, возникнув, разряд будет поддерживаться в стационарном состоянии.

Если ток не слишком большой, то дуговой разряд будет локализован в плазменный столб определенного, меньшего чем электроды диаметра. Область на электродах, в которых происходит основная часть эмиссии и поглощения электронов и ионов, носят названия анодного и катодного пятен. Этих пятен может быть и несколько. Эти пятна блуждают по поверхности электродов, а при увеличении тока их диаметр будет возрастать, пока они не займут всю поверхность электродов.

Основные источники теплоты при дуговом разряде — катодное и анодное пятна и джоулево тепло, выделяющееся в разрядном промежутке. Основная причина выделения теплоты в катодных и анодных пятнах — быстрое торможение положительно заряженных ионов и электронов, разогнанных электрическим полем в разрядном промежутке. При дуге, горящей в парах металла (сварка плавящимся электродом; такие дуги называются М-дугами), катодные и анодные пятна присутствуют на электродах всегда. При дуге в газах (сварка неплавящимся электродом) катодное пятно может и отсутствовать.

Температура на концах электродов при дуговом разряде в типовом случае достигает 3...4 тыс. градусов. С практической стороны было бы полезно знать, где (на катоде или аноде) она выше. К сожа-

лению, дать однозначный ответ не представляется возможным, так как это зависит от множества факторов.

Действительно, при малых токах на катоде обычно выделяется больше теплоты, чем на аноде. Однако с увеличением тока баланс начинает смещаться в пользу анода, и при больших токах уже до 80% теплоты может выделяться на аноде. Влияет на соотношение генерируемого тепла и среда, в которой горит дуга, и материал электродов.

С другой стороны, размер анодного пятна обычно больше катодного, что понижает в нем поверхностную плотность энергии против катодного, а значит, и температуру (среда дуги также влияет и на соотношение размеров этих пятен).

Температура в столбе дуги в первую очередь зависит от потенциала ионизации в плазме и, таким образом, от газовой среды. Так, для М-дуг усредненная температура составляет величину порядка 5000 °С, в аргоне 16 000 °С и в гелии 25 000 °С. В то же время зондовая температура (температура тела, внесенного в дугу) не будет сильно отличаться от температур катода или анода.

Причина этого кроется в том, что в то время как основным механизмом передачи энергии из катодов и анодов является теплопроводность, из столба дуги энергия преимущественно передается излучением (передача энергии из столба дуги за счет теплопроводности и конвекции мала из-за малой плотности плазмы дуги). И скорость передачи теплоты в первом случае много выше, чем во втором.

Дуговой разряд в широких пределах представляет собой саморегулирующуюся систему. Согласно принципу Штейнбека температура столба дуги и его токопроводящий радиус при данном токе и в данной среде автоматически (самопроизвольно) устанавливаются такими, чтобы напряженность в дуге при данных условиях стала минимально возможной. Этот эффект приводит к тому, что дуга обладает определенной вольтамперной характеристикой, форма которой слабо зависит от параметров системы электроды—источник тока.

Под действием электромагнитных сил (сил Лоренца) в дуговом разряде устанавливается повышенное давление, которое может достигать несколько десятков Паскалей. Это давление может способствовать перемешиванию расплава в сварочной ванне, деформировать поверхность последней и способствовать пере-

носу присадочного металла в сварочную ванну. Наличие этого давления имеет как положительное, так и отрицательное значение. Кроме этого давления на поверхность сварочной ванны действует и реакция отдачи испаряющегося материала. Степень деформации поверхности сварочной ванны зависит как от этих давлений, так и от коэффициента поверхностного натяжения расплава.

Плазменные струи, возникающие в дуге, могут иметь весьма высокие скорости. Так, у М-дуг они могут достигать  $10^4$  м/с. В газовых дугах они, как правило, на два порядка меньше.

Из-за столь высоких скоростей обдув М-дугой струей газа мало сказывается на параметрах плазмы дуги. Напротив, для газовых дуг (сварка неплавящимся электродом) параметры плазмы и, следовательно, характеристики дуги, будут зависеть в основном от газовой среды (защитного газа).

В физике при изучении дуговых разрядов большое внимание уделяют работе выхода. Однако при реальных режимах сварки плавящимся электродом происходит настолько быстрая эрозия и распыление электродов, что происходит как бы размывание поверхности раздела «твердое тело — газ». В результате и такие понятия, как температура поверхности и работа выхода, становятся неопределенными, и, таким образом, величина последней начинает слабо влиять на параметры дуги. При сварке неплавящимся электродом соотношение работ выхода имеет значение. При сварке на переменном токе разность работ выхода приводит к появлению постоянной составляющей сварочного тока (так называемый вентильный эффект). Этот эффект может ухудшить стабильность процесса сварки и вредно сказывается на работе сварочных трансформаторов.

**Сжатая дуга.** Если сжать дугу каким-либо образом, то плотность, температура, степень ионизации, а значит, и теплопроводность плазмы дуги возрастают. В результате дуга становится более эффективным источником нагрева, чем концы электродов. Такую дугу очень удобно использовать для резки материалов. Сжатую дугу получают в специальных устройствах — плазматронах (температура дуги в них достигает 20..30 тыс. градусов и даже больше).

### 2.2.2. Массоперенос в дуге

При сварке плавящимися электродами последние оплавляются, и расплав переносится в сварочную ванну. Частично это происходит за счет сил гравитации (при сварке в нижнем положении). Но основной движущей силой выступают электромагнитные силы, что дает возможность проводить сварку и в других, отличных от нижнего, положениях, вплоть до потолочного.

Перенос возможен в трех режимах:

1) большими каплями (в этом случае капля расплава на конце электрода закорачивает дуговой промежуток);

2) малыми каплями (когда последние не производят короткого замыкания);

3) струйный (фактически — потоком мелких капель, потому короткого замыкания также не происходит).

Перенос парами металла существует во всех режимах как дополнение к трем описанным механизмам.

Закорачивание сварочного зазора каплей ведет к всплеску сварочного тока и частичному испарению капли. Как результат, сварка в таком режиме характеризуется повышенным разбрызгиванием и неравномерностью шва. Потому такой режим, вообще говоря, не очень желателен, хотя для ручной дуговой сварки характерен именно он.

Струйный перенос рассматривается как самый благоприятный для процесса сварки, он наблюдается чаще всего при сварке в инертных газах тонкой сварочной проволокой. При сварке в молекулярных газах (азот, углекислый газ) достичь струйного переноса трудно.

Размер капель уменьшается с увеличением сил, действующих на расплав, и с уменьшением коэффициента поверхностного натяжения расплава. Первое происходит при увеличении силы тока, второе — при увеличении температуры расплава и, следовательно, также при увеличении тока. Таким образом, при автоматической и механизированной сварках, обычно происходящих при больших токах, чаще формируется мелкокапельный перенос.

Сварка на обратной полярности приводит к большему прогреву электрода и капель, что также способствует переходу к мелкокапельному переносу. По технологическим свойствам он находится между струйным и крупнокапельным переносом.

### 2.2.3. Электрические характеристики дуги

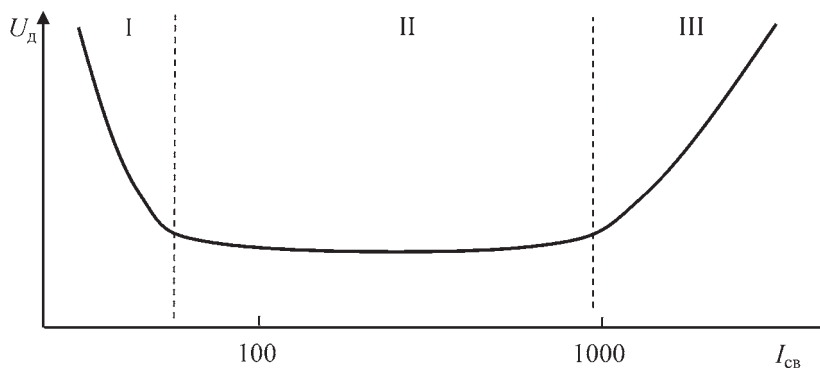
Типичная статическая вольтамперная характеристика дуги приведена на рис. 3. Она состоит из следующих характерных областей:

I — с увеличением тока быстро растет степень ионизации, а также увеличивается поперечное сечение дуги; в результате с ростом тока сопротивление дугового промежутка падает (т.е. дуга здесь обладает так называемым отрицательным сопротивлением);

II — степень ионизации достигла максимума, но поперечное сечение дуги все еще растет вместе с током; напряжение на дуге практически не зависит от тока (т.е. сопротивление дуги близко к нулю);

III — катодное или анодное пятно занимает всю площадь торца электрода, и сечение дуги не может сильно меняться с током (некоторое увеличение сечения все же наблюдается за счет «разбухания» дуги из-за «расталкивания» силовых линий силами Лоренца). Степень ионизации достигла максимума еще раньше. Таким образом, сопротивление дуги становится положительным и почти постоянным. В результате напряжение на дуге растет с током.

В области I происходит сварка на малых токах. Падающая характеристика дуги ухудшает стабильность дуги и предъявляет специальные требования к сварочным аппаратам (см. п. 2.2.5).



**Рис. 3. Схематизированная статическая вольтамперная характеристика электрической дуги:**

$I_{св}$  — ток дуги,  $U_d$  — напряжение на дуге

Ручную дуговую сварку осуществляют чаще всего в области II. Дуга в этом режиме работает как стабилизатор. Напряжение на дуге слабо зависит от тока, и ток слабо зависит от напряжения.

Напряжение на дуге прямо пропорционально ее длине:  $U_d = a + b l_d$ , где  $l_d$  — длина дуги;  $a$  и  $b$  коэффициенты, зависящие от материала электрода и газовой среды. Следовательно, при сварке в этом режиме ток будет слабо зависеть также и от длины разрядного промежутка. Понятно, что это особенно важно при ручной сварке, при которой трудно поддерживать постоянное расстояние от торца электрода до детали.

Область III соответствует весьма высоким значениям тока. В этой области производят, как правило, только автоматическую сварку.

#### 2.2.4. Особенности сварки на переменном токе

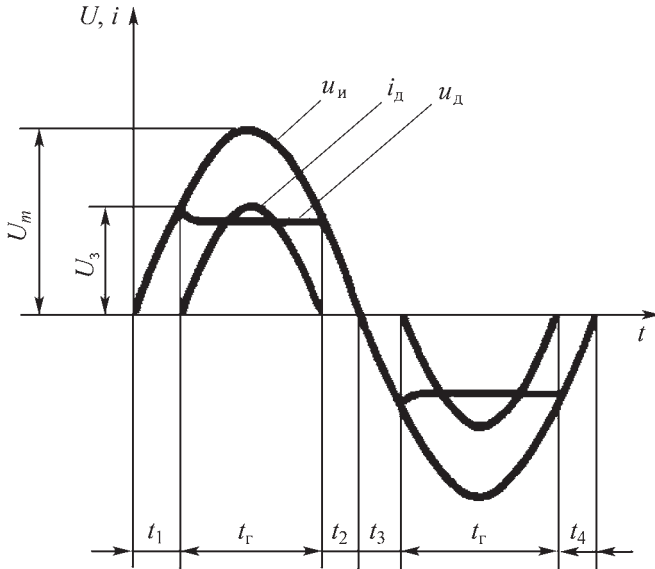
Рассмотрим совмещенную временную диаграмму напряжений и токов при питании дуги переменным током (рис. 4) (так как сопротивление дуги преимущественно активное, то напряжения и ток совпадают по фазе).

Видно, что дуга горит не все время, и относительное время горения дуги тем больше, чем ниже  $U_3$  и  $u_d$  и больше  $U_m$ . Снижение относительного времени горения дуги понижает ее среднюю мощность и эффективность сварки.

$U_m$  повышать нельзя по соображениям техники безопасности — максимальное напряжение не должно превышать 90 В. Напряжение дуги снижают, применяя электроды с ионизирующими обмазками. Для облегчения зажигания дуги и снижения тем самым  $U_3$  могут использоваться высоковольтные высокочастотные генераторы.

#### 2.2.5. Устойчивость системы дуга — источник питания

Условные вольтамперные характеристики дуги и источника питания приведены на рис. 5. Точка  $A_1$  соответствует минимальному току и напряжению, близкому к напряжению холостого хода (напряжению на клеммах источника при разомкнутой цепи). Потому это точка зажигания дуги. Рассмотрим поведение системы в ее окрестностях.

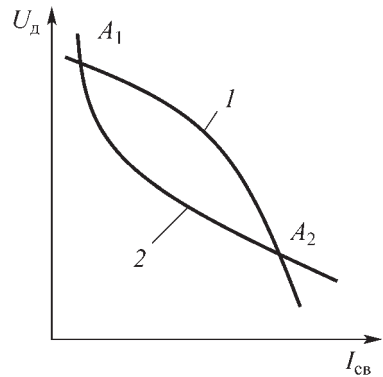


**Рис. 4. Совмещенная диаграмма токов и напряжений при питании дуги переменным током:**

$u_{и}$  — мгновенное напряжение холостого хода источника питания;  $i_{д}$  — мгновенное значение силы тока дуги;  $u_{д}$  — рабочее напряжение на дуге;  $U_m$  — амплитудное напряжение холостого хода источника;  $U_3$  — напряжение зажигания дуги, обычно  $U_3 \cong (1,3...2,5)u_{д}$ ;  $t_1$  и  $t_4$  — периоды горения и погасания дуги

**Рис. 5. Совмещенные вольтамперные характеристики (ВАХ) дуги (1) и источника (2):**

$A_1$  и  $A_2$  — рабочие точки



Пусть напряжение на клеммах по каким-либо причинам упадет (например, «просадка» напряжения в питающей сети). В результате напряжение на клеммах станет меньше требуемого дугой, и дуга погаснет. То же произойдет при случайном увеличении напряжения на дуге — источник не сможет выдать требуемое напряжение.

Если напряжение на клеммах источника по каким-либо причинам несколько возрастет либо напряжение на дуге случайно уменьшится, то напряжение на клеммах превысит напряжение дуги, что приведет к возрастанию тока и «скольжению» рабочих точек вправо, вплоть до достижения точки  $A_2$ . Таким образом, равновесие в точке  $A_1$  оказывается нестабильным.

Подобный же анализ показывает, что равновесие в точке  $A_2$  оказывается стабильным, и это и есть рабочая точка. Более формально подобный анализ можно провести с привлечением правил Кирхгофа.

**Очевидно, что для того, чтобы параметры дуги в рабочей точке были стабильными, необходимо и достаточно, чтобы характеристика источника в рабочей точке была более крутопадающей, чем у дуги.**

Вышесказанное объясняет причины сложности сварки на малых токах, когда характеристика дуги крутопадающая. Характеристика источника должна быть еще более крутопадающей, почти вертикальной (подобные характеристики называют «штыковыми»). Относительно просто можно получить такие характеристики только с помощью электронных схем.

При сварке на средних токах характеристика источника должна быть падающей, что можно получить на специальных сварочных трансформаторах или с помощью балластных сопротивлений. Если применить обыкновенный силовой трансформатор с жесткой, почти горизонтальной характеристикой, то без балластных сопротивлений или дросселя он будет «жечь», сварка будет нестабильной, а сам источник легко может выйти из строя (сварочный ток будет «прыгать» от точки  $A_1$  до тока короткого замыкания, вместо того чтобы находиться вблизи точки  $A_2$ ).

При сварке на больших токах, когда характеристика дуги восходящая, для ее питания можно применять силовые трансформаторы

с жесткой характеристикой. Так обычно и поступают, применяя для автоматической сварки источники с силовыми трехфазными трансформаторами.

### 2.2.6. Магнитное дутье

Токи при прохождении через изделие, включенное в сварочную цепь, будут создавать магнитное поле. При несимметричном относительно дуги подводе тока несимметричное результирующее магнитное поле будет отклонять дугу (дуговой столб можно рассматривать как гибкий проводник, отклоняющийся в сторону уменьшения плотности магнитных силовых линий). То же может наблюдаться при наличии значительных ферромагнитных масс с какой-либо стороны от дуги (например, при сварке патрубков в массивные корпусные детали). Этот эффект носит название магнитного дутья.

При сварке на переменном токе в изделии будут генерироваться вихревые токи, система которых образует собственное переменное электромагнитное поле, сдвинутое по фазе практически на  $180^\circ$  по отношению к полю, создаваемому сварочным током. В результате результирующее поле оказывается существенно меньшим, и магнитное дутье не наблюдается.

Для минимизации эффекта магнитного дутья следует стремиться осуществлять подвод тока в точке, максимально близкой к дуге, проводить сварку короткой дугой или применять переменный ток.

Эффект отклонения дуги внешним магнитным полем иногда используется и специально. Так, накладывая внешнее переменное магнитное поле, дугу заставляют отклоняться от положения равновесия в такт с полем. Прием получил название «метелка» и применяется, например, при сварке вращающейся дугой трубных досок в котлах.

Была разработана технология стыковой дуговой сварки с применением этого эффекта и для трубопроводов — так называемая сварка бегущей дугой. На концы труб надеваются две катушки, включенные встречно. Благодаря этому в зазоре между трубами создается радиальное магнитное поле. Если между торцами за-

жечь дугу, то на нее будет действовать тангенциальная сила, и дуга будет обегать стык по периметру. После разогрева торцов дугу выключают и осуществляют осадку.

## 2.3. ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИИ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ СВАРКИ

### 2.3.1. Сварочная ванна

Основная задача источника тепла при сварке плавлением — расплавить какую-то область материала. При кристаллизации последней будет образовано сварное соединение. Эта зона расплава называется сварочной ванной.

Сварочная ванна образуется вокруг области ввода тепла и в плане обычно повторяет изотерму плавления (см. рис. 1 и 2). В поперечном сечении мгновенная форма сварочной ванны похожа на представленную на рис. 6, т.е. имеет ступенчатую форму (чем более концентрированный источник энергии, тем более выражена ступенька, потому при газовой сварке ее почти что нет, тогда как при КПЭ-сварке глубины в головной и хвостовой частях ванны отличаются во много раз; при дуговой сварке ситуация промежуточная).

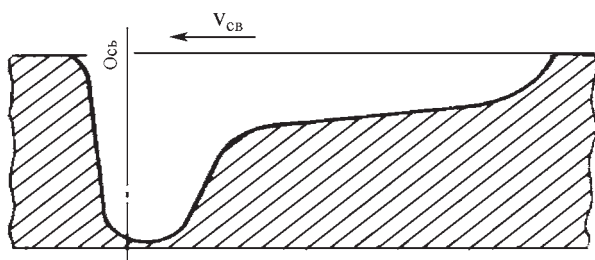


Рис. 6. Форма сварочной ванны в продольном сечении

Аналитический расчет формы сварочной ванны затруднен. Он требует решения теплофизической задачи распространения теплоты с учетом эффекта плавления (так называемая задача Стефана), решение которой весьма сложно. Более того, в большинстве случа-

ев в сварочной ванне наблюдается и массоперенос, что требует уже учета гидродинамических явлений.

Экспериментально форму сварочной ванны определяют двумя способами:

1 — проплавлением пластины, зажатой между двумя прозрачными кварцевыми пластинами, и скоростной фотосъемкой процесса;

2 — мгновенный «отстрел» (выбивание) расплава из сварочной ванны, осуществляемый электромагнитным пульсатором, при выключении в тот же момент теплового источника (дуги и т.п.).

Глубокая головная часть сварочной ванны плавится непосредственно за счет подводимой тепловой энергии. Хвостовая часть образуется благодаря плавлению материала перегретым расплавом головной части. Потому температуры в этих зонах сильно различаются: если в хвостовой части температура лишь несколько превышает температуру плавления, то в головной части температура может быть близка к температуре кипения. Более того, при сварке с помощью интенсивных тепловых источников здесь может существовать парогазовый канал. При сварке малоинтенсивными источниками (например, газовым пламенем) температуры в ванне более равномерные. Однако более глубокая зона в головной части может сохраниться и в этом случае за счет выдавливания расплава давлением газов.

При дуговой сварке давление дуги может вытеснять расплав в ту или иную сторону и несколько изменять форму сварочной ванны. Если электрод установлен так, что расплав вытесняется в хвостовую часть ванны, то в головной слой его становится тоньше, а это уменьшает тепловое сопротивление под электродом и ванна углубляется.

При наклоне электрода в противоположную сторону, расплав из хвостовой части ванны «накачивается» в головную, и из-за большей его толщины под электродом, плавление замедляется и глубина ванны уменьшается (в первом случае говорят, что сварку ведут «углом назад», в последнем «углом вперед», рис. 7).

Форма и размеры сварочной ванны также существенно зависят и от характера подачи и температуры присадочного материала. Так, при подаче холодной сварочной проволоки сварочная ванна становится короче.

Кристаллизация сварочной ванны начинается с поверхности раздела, и на периферии сварочной ванны обычно формируется

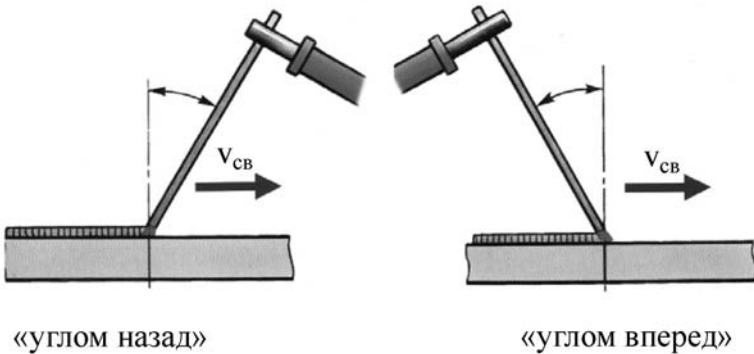


Рис. 7. Положение электрода при сварке

столбчатая структура, вытянутая по направлению отвода тепла (т.е. примерно перпендикулярная поверхности раздела). По центру сварочной ванны обычно формируются равноосные, большего размера кристаллы. Размер кристаллитов зависит от скорости кристаллизации. Последняя зависит от скорости охлаждения. В общем случае, чем меньше размер ванны и выше скорость сварки, тем выше скорость охлаждения.

Если ванна охлаждается достаточно медленно (например, при сварке под флюсом и особенно при электрошлаковой сварке), то размер кристаллитов оказывается большим, что снижает пластические свойства и ударную вязкость металла шва. Для снижения размера кристаллитов и измельчения структуры в расплав вводят модификаторы (алюминий, титан, ванадий).

Форму ванны характеризуют относительной глубиной проплавления  $h / b$  или обратной ей величиной — коэффициентом формы шва:

$$K = b/h,$$

а также коэффициентом полноты проплавления:

$$\mu = F/(bh),$$

где  $b$ ,  $h$  — соответственно ширина и глубина сварочной ванны;  $F$  — реальная поперечная площадь проплавления (поперечная площадь шва).

Для дуговой сварки обычно  $\mu = 0,6...0,8$ . Величину выпуклости (усиление) шва оценивают через коэффициент

$$K_y = b/a,$$

где  $a$  — высота выпуклости шва.

Для дуговой сварки оптимальное значение коэффициента формы шва  $K = 1,2...2$ . Для КПЭ-сварки, например лазерной, оптимальное значение этого коэффициента меньше 1. Чем меньше этот коэффициент, тем меньше тепловложение, и, как результат, ниже температура нагрева свариваемых деталей и меньше сварочные деформации. С другой стороны, уменьшение этого коэффициента приводит к ухудшению дегазации шва.

Коэффициент долей основного металла в металле шва:

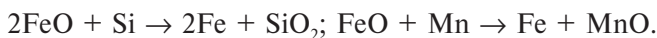
$$K_o = F_o/F_{ш},$$

где  $F_o$  и  $F_{ш}$  — площади поперечного сечения соответственно переплавленного основного металла и всего шва. Коэффициент используют при анализе легирования шва присадочным материалом.

### 2.3.2. Металлургические процессы при сварке

Основные отличительные особенности сварки как металлургического процесса — это высокая температура расплавленного металла и малое время пребывания его в расплавленном состоянии. Так, непосредственно под дугой температура в сварочной ванне достигает 2300 °С, а средняя температура по сварочной ванне — 1600...1900 °С. Характерными особенностями сварки являются также высокие скорости нагрева и охлаждения, малый объем расплава, его достаточно интенсивное перемешивание, большие температурные градиенты. Как видно, сварка имеет довольно много особенностей, отличающих ее от «большой» металлургии.

В металлургии сварки плавлением наиболее важны процессы раскисления металла сварочной ванны и кристаллизация металла шва. Характерными являются реакции раскисления закиси железа кремнием и марганцем:



Оксиды кремния и марганца переходят в шлак.

Раскислителями могут выступать кремний, марганец, титан, алюминий, углерод. Раскислители могут содержаться в основном металле, в присадочном материале, но чаще всего поступают из флюса (из обмазки или порошкового флюса при автоматической сварке под флюсом).

Большинство раскислителей вводят в покрытие или флюс в виде ферросплавов (ферросилиций, ферромарганец, ферротитан и пр.). Алюминий вводят в виде порошка. Недостаток раскисления алюминием заключается в том, что последний образует тугоплавкие оксиды, часть которых остается в шве, снижая его прочность. Раскисление графитом дешево, но приводит к образованию оксида углерода, кипению расплава и, как результат, к пористости шва.

### 2.3.3. Взаимодействие расплава с газами

Газовая фаза, контактирующая с расплавом, содержит такие газы, как азот, кислород, водород, углекислый газ, пары воды, пары металлов и шлаков. В зоне высоких температур эти газы атомизируются, что резко усиливает их активность.

Кислород окисляет железо, образуя оксиды железа. Однако в первую очередь окисляются элементы, обладающие бóльшим сродством к кислороду (например, Ti, Mn).

Азот с железом и многими другими конструкционными металлами образует нитриды. Нитриды имеют высокую твердость, хрупки, потому азотирование при сварке снижает вязкость шва.

Водород растворяется в металлах. С некоторыми из них (например, Ti, Zr, V) он образует гидриды, с другими (такими, как Fe, Ni, Co, Cu) — нет. Однако в обоих случаях он приводит к охрупчиванию шва.

Углекислый газ диссоциирует на атомарный кислород и CO. Атомарный кислород окисляет металлы, а закись углерода растворяется в расплаве, но выделяется при кристаллизации, что приводит к пористости шва. Водяной пар диссоциирует на кислород и водород.

Таким образом, взаимодействие расплава с окружающими газами носит неблагоприятный характер, и потому сварочную ванну нужно защищать от контакта с атмосферой.

### 2.3.4. Защита сварочной ванны

Защита сварочной ванны может быть решена тремя способами:

- шлаковой защитой;
- газовой защитой;
- сваркой в вакууме.

Последний способ наиболее радикальный, но и наиболее дорогостоящий и наименее технологичный, применяется достаточно редко. Рассмотрим первые два.

**Шлаковая защита.** Шлаки представляют собой минеральные вещества, находящиеся при сварке в жидком состоянии и покрывающие зеркало расплава. Шлаки полностью не изолируют расплавленный металл от окружающей среды, а только заменяют непосредственное взаимодействие диффузионным. Получаются шлаки при плавлении флюсов.

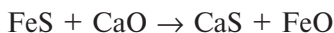
Температура плавления флюсов должна быть ниже температуры плавления свариваемых металлов, а их плотность в расплавленном состоянии много меньше плотности расплава свариваемого металла (таким образом, чтобы расплав флюса плавал на поверхности сварочной ванны).

Для сварки применяют только восстановительные флюсы (шлаки). По характеру взаимодействия с металлом шлаки могут иметь кислый или щелочной характер.

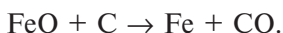
Изменение вязкости расплава шлаков в зависимости от температуры может быть резким (рис. 8, 2) или плавным (1). Соответственно, шлаки называют «короткими» и «длинными». Оптимальное сочетание вязкости расплава шлака и характера ее изменения с температурой разное для различных видов сварки.

Важным параметром является степень сцепления закристаллизовавшейся шлаковой корочки с поверхностью металла, так как от этого зависит легкость ее удаления.

Кроме защиты, шлаки могут понижать содержание в расплаве вредных примесей. Так, удаление серы в основных шлаках обычно происходит по реакции



(оксид железа потом восстанавливается шлаком), а также за счет окисления углерода в стали:



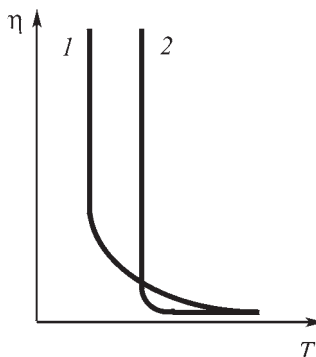


Рис. 8. Изменение вязкости в зависимости от температуры у «длинных» (1) и «коротких» (2) шлаков

Таким образом, при сварке может происходить обезуглероживание сварного шва. На практике при электрошлаковой сварке происходит практически полное удаление серы, при дуговой сварке — частичное.

Снизить содержание фосфора при дуговой сварке не удастся, так как это возможно только при окислительных шлаках, а все сварочные шлаки восстановительные. При электрошлаковой сварке наблюдается незначительное снижение фосфора.

Содержание углерода при сварке может как понизиться за счет выгорания, так и повыситься за счет контакта с углеродосодержащими веществами. Чаще оба эти процесса рассматриваются как нежелательные.

**Газовая защита.** Для защиты сварочной ванны могут применяться не только флюсы, но и защитные газы. Вступающие во взаимодействие с металлом газы называют *активными*, в противном случае *нейтральными*. Нейтральным или активным будет данный газ — зависит и от свариваемого металла. Так, азот будет активным по отношению к железу и хрому, но нейтральным при сварке меди и кобальта. Инертные газы практически полностью нейтральны со всеми металлами. Сварка в защитных газах позволяет получить сварные швы, более чистые по шлаковым включениям, чем это возможно при сварке под флюсом.

Наиболее часто в качестве защитных газов применяют аргон, углекислый газ и их смеси. Азот применяют при сварке меди.

Гелий обеспечивает лучшую устойчивость дуги и большее проплавление. Однако он легче воздуха и потому оттесняется последним, что усложняет защиту. Напротив, аргон тяжелее воздуха и вытесняет воздух. Кроме того, гелий много дороже. Потому гелий применяется только при лазерной и плазменной сварке (чаще всего в смеси с аргоном).

Коллектив авторов, разработавший в 60-е годы XX в. сварку с защитой углекислым газом, получил государственную премию, так как подобная сварка много дешевле аргоновой. В отличие от инертных газов,  $\text{CO}_2$  при сварке диссоциирует на  $\text{CO}$  и кислород, что делает такую атмосферу окислительной.

Для минимизации этого вредного эффекта сварку в  $\text{CO}_2$  проводят сварочными материалами с избытком марганца и/или кремния, в той или иной мере нейтрализующих окислительное действие. Однако качество сварки все равно несколько хуже, чем в инертных газах.

Кроме того, в центральной части дуги молекулы  $\text{CO}_2$  диссоциируют, а в периферийной рекомбинируют. Первый процесс идет с поглощением энергии, второй — с выделением, и в результате происходит перенос энергии с центра разряда на периферию. Таким образом, ширина шва увеличивается, а глубина уменьшается. Чаще всего это явление может рассматриваться как неблагоприятное.

С другой стороны, при углекислотной сварке происходит связывание водорода в воду:  $\text{H}_2 + \text{CO} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}$ ; содержание водорода в шве снижается, уменьшается пористость. Кроме того, из-за большего удельного веса углекислый газ очень хорошо оттесняет воздух, и газовая защита с его помощью упрощается. Таким образом, сварка в углекислом газе имеет свои преимущества и недостатки по сравнению со сваркой в инертных газах.

Иногда к аргону, углекислому газу или их смеси добавляют 5...10 % кислорода, который способствует переходу капельного переноса в струйный. В результате повышается производительность сварки, улучшается формирование шва, снижается разбрызгивание.

В качестве защитной среды когда-то применяли и перегретый водяной пар, являющийся, видимо, самой дешевой защитной средой. Однако в этом случае металл будет поглощать большое количе-

ство водорода:  $\text{H}_2\text{O} + \text{Fe} \rightarrow \text{FeO} + \text{H}_2$ ;  $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}$ . Потому сварка ответственных изделий с подобной защитой невозможна. В настоящее время такая защита шва применяется только при сварке жидкостными плазматронами (см. 3.3.1).

Качество защиты зависит не только от вида защитного газа, но и от его расхода и конструктивного оформления системы защиты. Истечение газа должно быть ламинарным, при турбулентном потоке происходит подсос воздуха и ухудшение защиты, потому параметры сопла сильно сказываются на качестве защиты. Существует оптимальный расход защитного газа, при отклонении от которого не только в меньшую, но и в большую сторону защита может ухудшаться. При резке необходимо стремиться к максимальной скорости газового потока на входе в рез. Отсюда вытекает важность учета газовой динамики как при проектировании устройств напуска газа, так и при выборе режима напуска.

### 2.3.5. Газовая динамика и сопловый аппарат

*Сопловым аппаратом*, или просто соплом, называется устройство, предназначенное для разгона жидкостей или газов и придания потоку заданного направления. В простейшем случае соплом будет являться конец трубки, по которой газ подается в зону резки или сварки. В общем случае профиль сопла может быть цилиндрическим, коническим (расширяющимся или суживающимся) или комбинированным.

Интуитивно кажется, что для ускорения струи сопло должно быть суживающимся. И теоретическое рассмотрение показывает, что для дозвуковых скоростей газовых потоков это действительно так. Однако сверхзвуковые потоки будут ускоряться только в расширяющихся соплах (связано это с уменьшением плотности газа при ускорении, что следует из закона сохранения энергии).

Таким образом, для эффективного ускорения газа до сверхзвуковых скоростей применяют сопла сложной формы: сначала суживающееся, а потом расширяющееся. Такие сопла называются *соплами Лавала*.

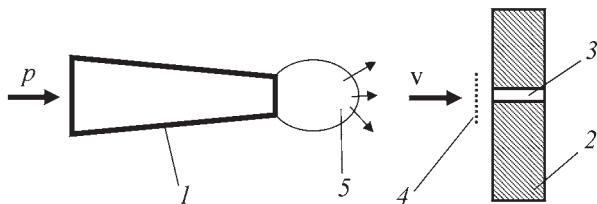
Расчет подобного сопла может быть весьма сложным делом, особенно с учетом искажающего влияния на динамику газов значительных температурных потоков, характерных для сварки и резки.

Тем не менее, наличие качественного сопла очень важно. Специалисты по лазерной резке говорят даже, что качество лазерного реза зачастую в большей мере зависит от качества соплового аппарата, чем от качества оптики и параметров самого лазера. К сожалению, при создании аппаратов для более традиционных методов огневой резки, например воздушно-дуговой, проектированию сопла часто уделяют недостаточно внимания.

Разумеется, технолог-сварщик, и тем более рабочий-сварщик, не занимаются расчетом и изготовлением сопла. Единственное, чем они могут оказывать влияние на динамику газа, это изменением давления в системе напуска. Потому рассмотрим данный вопрос подробнее.

Как уже говорилось выше, для интенсификации резки надо стремиться увеличивать скорость потока газа в резе. Интуитивно кажется, что для этого надо повышать давление и тем самым скорость истечения газа из сопла. Однако это оказывается верным далеко не всегда.

В случае, если мы имеем суживающееся сопло (конфузор), никакое повышение давления не сможет увеличить скорость газа на срезе сопла выше скорости звука. Давление, при котором это происходит, называется критическим. При превышении давления на входе в конфузор над критическим будет повышаться лишь давление на выходе сопла, а не скорость истечения. Газ вытекает в среду, имея давление большее, чем давление среды (рис. 9). Из-за этого избыточного давления будет происходить небольшое ускорение газа за срезом сопла, но струя при этом будет сильно размываться.



**Рис. 9.** Схема натекания газового потока из сопла на деталь:

1 — сопло-конфузор; 2 — деталь; 3 — рез; 4 — диск Маха; 5 — область избыточного давления на выходе при превышении давления на входе над критическим;  $p$  — давление на входе в сопло;  $v$  — скорость натекающего на деталь газового потока

Таким образом, при использовании сопла-конфузора оптимальным будет достижение критического давления. Однако и применение сопла Лаваля не сильно меняет картину.

Действительно, при набегании сверхзвукового потока на поверхность на некотором расстоянии от нее образуется «скачок» уплотнения — ударная волна, называемая *дискон Маха*. И на этом диске будет соблюдаться газодинамическое условие:

$$\tilde{\lambda}_1 \tilde{\lambda}_2 \equiv 1,$$

где  $\tilde{\lambda}_1, \tilde{\lambda}_2$  — коэффициент скорости соответственно до скачка и после (коэффициент скорости в первом приближении можно рассматривать как скорость, выраженную в долях местной скорости звука, т.е. в числах Маха).

Таким образом, с увеличением скорости газовой струи скорость газа, набегающего на поверхность и входящего в рез, будет увеличиваться только до тех пор, пока не достигнет критической (местной скорости звука). При дальнейшем увеличении скорости газовой струи скорость под диском Маха (т.е. скорость на входе в рез) начнет **уменьшаться!** Следовательно, оптимальным давлением будет такое, при котором скорость набегания газового потока на деталь будет равна критической (местной скорости звука).

Если сопло располагают не очень далеко от зоны обработки, падение скорости потока на участке срез сопла — поверхность не будет значительным, и оптимальное давление на входе сопла также не будет сильно отличаться от критического. Осталось найти значение этого критического давления  $p_{кр}$ .

Оказывается, что оно зависит только от показателя адиабаты  $\gamma$  рабочего газа:

$$\frac{p_A}{p_{кр}} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)},$$

здесь  $p_A$  — давление окружающей среды (атмосферное давление в данном случае).

Показатель адиабаты для многоатомных газов ( $\text{CO}_2$  и пр.) равен 1,3; для двухатомных — 1,4 и одноатомных — 1,6. Данный расчет точен при отсутствии источников теплоты. Наличие последних при сварке и резке вносит погрешность, зависящую от плотности теп-

ловой энергии в газовом потоке. Расчет давлений и расхода для активного газа сложнее, так как значительная часть последнего будет участвовать в химических реакциях.

**Задача 5.** Рассчитать оптимальное давление на выходе воздушного компрессора при воздушно-дуговой резке.

#### Решение

Оптимальным будет давление, при котором обеспечивается максимальная скорость газового потока на входе в рез. Пренебрегая потерей скоростного напора между соплом и деталью, рассчитаем критическое давление на входе в сопло.

Так как воздух на 99 % состоит из двухатомных газов ( $N_2$  и  $O_2$ ), то показатель адиабаты для него очень близок к 1,4. Тогда в соответствии с формулой

$$\frac{p_A}{p_{кр}} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)}$$

критическое давление будет в 1,9 раза выше атмосферного, т.е. 0,186 МПа. Учитывая наличие некоторой потери давления в подводящих магистралях, с некоторым запасом принимаем оптимальное давление компрессора в 0,2 МПа.

### 2.3.6. Зона термического влияния

Вводимая при сварке теплота за счет теплопроводности распространяется от области нагрева в стороны, нагревает прилежащие к шву участки, и в околошовной зоне возникает температурный градиент. В поперечном сечении температура изменяется от максимальной, обычно имеющей место по оси шва, до минимальной в удалении от шва (равной температуре окружающей среды или температуре сопутствующего подогрева). Теоретически, температура падает до равновесной на бесконечности, но практически уже через несколько сантиметров ее можно считать таковой.

Зона по обе стороны от шва, в которой температура нагрева достаточна для прохождения в материале каких-либо превращений, называется *зоной термического влияния*, или ЗТВ. Схематично структура ЗТВ представлена на рис. 10.

В области II, примыкающей к шву, температуры по ЗТВ максимальны. Это область перегрева, приводящего к росту зерна и, воз-

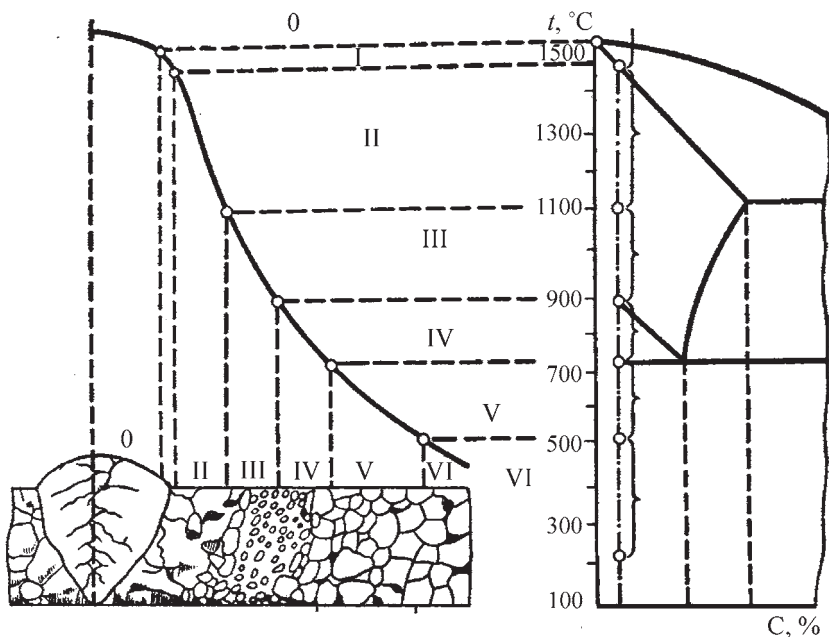


Рис. 10. Структура ЗТВ

можно, даже некоторому пережогу (окислению по границам зерна), что, очевидно, приводит к снижению механических свойств.

Между собственно швом 0, в котором фиксируется литая структура, и началом ЗТВ (II) лежит очень узкая (десятые доли миллиметра) переходная область I, отделяющая сварочную ванну и шов от основного металла. Это так называемая зона сплавления, зерна металла здесь лишь частично оплавлены, наблюдается сильная разнорзернистость и скопление примесей. Этот участок считается наиболее слабым участком сварного соединения.

Область III нагревалась выше  $A_{c_3}$ , а область IV — до температур, лежащих в диапазоне  $A_{c_1} \dots A_{c_3}$ , т.е. первая из них подвергалась полной, а вторая неполной перекристаллизации. В результате перекристаллизации зерна в области III измельчаются, причем из-за кратковременности процесса вырасти зерна, скорее всего, не успе-

ют даже у наследственно крупнозернистой стали. В результате область III состоит из более мелких зерен, чем исходная сталь, и механические свойства здесь выше, чем в исходной стали.

Область IV содержит как измельчившиеся зерна (претерпевшие перекристаллизацию), так и более крупные исходные зерна феррита, в которых перекристаллизации не было. Диффузионное перераспределение углерода между ферритными и перлитными зернами также не успеет произойти. Разнозернистость и гетерогенность по углероду снижают механические свойства, но не очень значительно, и механические свойства здесь все еще могут быть как выше, так и ниже исходных.

Если сталь при скоростях охлаждения, при которых проводилась сварка, закаливается, то во всех вышеперечисленных областях произойдет подкалка. В результате вырастет твердость, а пластичность и вязкость снизятся. Особенно заметным это снижение будет в областях I и II, где сформируется крупноигльчатый мартенсит.

В области V будет происходить отпуск. При сварке закаленной стали это приведет к распаду мартенсита и снижению твердости. При сварке нагартованной стали произойдет рекристаллизация, возврат, что также снизит твердость. В большинстве же случаев, однако, стали свариваются в отожженном или нормализованном состоянии. В таких сталях заметных структурных превращений в области V не будет.

В области VI структурных превращений не происходит. Длительность нагрева слишком мала, чтобы при таких температурах происходил заметный отпуск. Возможно, однако, проявление отпускной хрупкости в областях V и VI.

Таким образом, видно, что ЗТВ содержит весь спектр структур, которые можно получить при термообработке сталей с различными температурами.

Если сталь сильно легирована аустенитостабилизирующими элементами, то при закалке становится возможным зафиксировать в ней аустенитное состояние (полное или частичное). Материалы с ГЦК решеткой обладают более высокой вязкостью. Потому при сварке таких сталей оказывается целесообразным не понижать, а повышать скорость охлаждения, что приведет к увеличению доли  $\gamma$ -фазы (аустенита) и, как результат, вязкости.

Нельзя не считаться и с взаимным влиянием зон друг на друга. Так, деформация, начавшаяся в пластичной зоне, дойдя до твердого, остановится. В результате напряжения перераспределятся и сконцентрируются в последней. Как результат, здесь становится весьма вероятным образование трещин. С другой стороны, пластичные прослойки могут остановить трещину. Таким образом, поведение многослойных структур весьма сложное. Еще более оно усложняется при двух- или трехосном напряженном состоянии.

### 2.3.7. Сварочные деформации и напряжения

В процессе сварки могут возникнуть внутренние напряжения, которые приводят к короблению деталей и понижают прочность шва.

Если после проведения каких-либо манипуляций с материалом в нем остались те или иные внутренние напряжения, то такие напряжения называются *остаточными*. Наиболее опасны растягивающие напряжения, так как они приводят к раскрытию трещин. Умеренные сжимающие напряжения могут быть даже полезными, поскольку они приводят к закрытию микротрещин, повышают прочность и износостойкость. Значительные сжимающие напряжения также опасны, они могут приводить к шелушению поверхности.

Существует несколько классификаций остаточных напряжений. Так, по размерности их разделяют на линейные, плоские и объемные или пространственные. Применительно к сварным швам они делятся на поперечные и продольные (соответственно действующие поперек и вдоль сварного шва; первые более опасны с точки зрения снижения прочности и возникновения трещин, вторые более влияют на коробление деталей).

По причинам возникновения напряжения подразделяют на фазовые, термические и усадочные. **Фазовые** возникают вследствие фазовых превращений в твердом теле, когда удельные объемы фаз различны (так, удельный объем у мартенсита на 2% больше, чем у феррита и перлита, потому в подкаленной зоне возникают сжимающие фазовые остаточные напряжения, а в окружающих участках — компенсирующие растягивающие).

**Усадочные напряжения** возникают в результате уменьшения удельного объема материала сварочной ванны при затвердевании (усадке). Данный эффект может привести к возникновению не только напряжений и сварочных деформаций, но и дефектов шва. Часто усадочные напряжения рассматривают как разновидность фазовых, так как затвердевание это тоже фазовое превращение.

Если деталь подвергается неравномерному нагреву или охлаждению, и в ней существуют температурные градиенты, то неравномерность термического расширения приводит к появлению **временных термических напряжений**. Однако после выравнивания температур эти напряжения исчезают. Если же временные термические напряжения были достаточно велики, чтобы вызвать локальные пластические деформации, то после охлаждения и выравнивания температур в детали возникнут напряжения, по знаку противоположные временным, которые называют **термическими остаточными напряжениями**. Механизм их образования следующий.

Представим себе, что в результате нагрева произойдет повышение температуры той или иной области детали. Нагретая область расширяется и растягивает окружающие более холодные слои. Поэтому в нагретой области возникнут напряжения сжатия, а в более холодных окружающих слоях — напряжения растяжения. Когда напряжения превысят предел текучести (пониженный при повышенных температурах), в нагретой области произойдет пластическая усадка, и, охладившись, она должна бы стать более короткой, чем до нагрева, но этому снова воспрепятствуют окружающие слои. В результате подвергшаяся такому температурному циклу область будет находиться в растянутом состоянии, а окружающие слои — в сжатом. Возникают постоянные напряжения, которые и называют остаточными термическими напряжениями, причем видно, что их знак противоположен временным термическим. Так как предел текучести при комнатных температурах более высок, и остаточные термические напряжения его не достигают, то далее они уже не изменяются (снизить их, как правило, можно только последующим нагревом).

При сварке может происходить сложение фазовых, термических и усадочных напряжений и общая картина распределения остаточных напряжений сильно усложняется. Так, при сварке ферритных

незакаливаемых низкоуглеродистых сталей напряжения в шве имеют преимущественно термическую природу, и в шве формируются продольные остаточные растягивающие напряжения, а в ЗТВ — компенсирующие сжимающие (рис. 11, а).

В закаливаемых мартенситных сталях в шве и в центральной части ЗТВ происходит подкалка, и в результате суперпозиции фазовых и термических напряжений здесь формируется зона сжимающих напряжений. В окружающей зоне отпуска образуется очень опасная узкая область высоких растягивающих напряжений, а в окружающих периферийных участках компенсирующие напряжения могут быть как растягивающими, так и сжимающими (рис. 11, б).

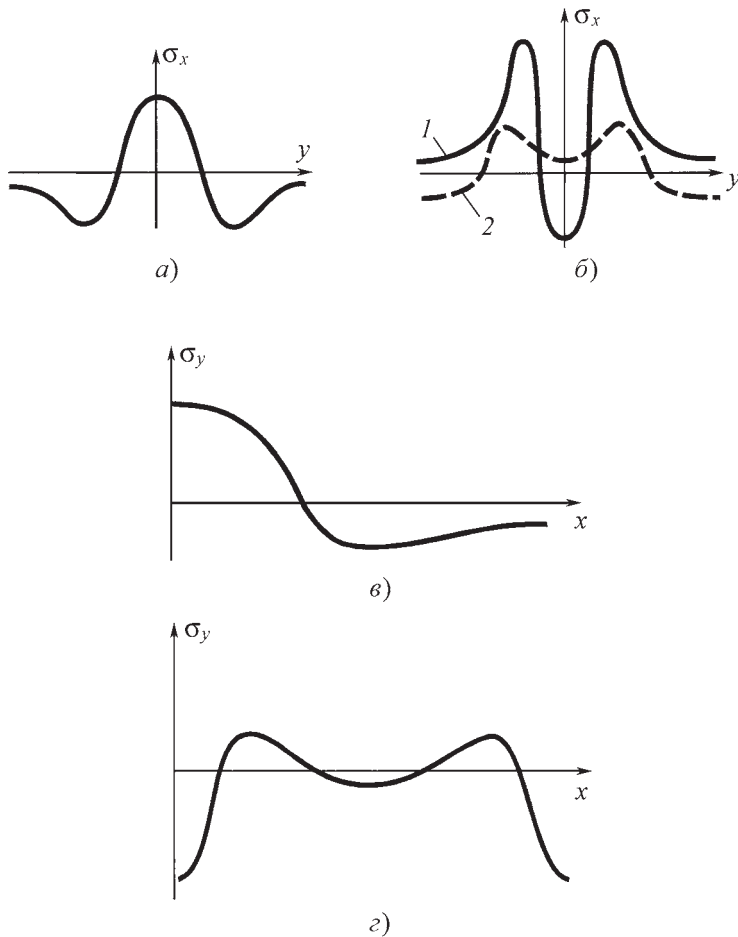
На рис. 11 в, г показано, как скорость сварки влияет на поперечные остаточные напряжения. При этом может меняться даже общий характер их распределения.

Остаточные напряжения также разделяют на *макро-* и *микронапряжения*. Первые действуют во всей детали или ее части, вторые — в объемах, сопоставимых с дислокационными.

Существует довольно много методик измерения макронапряжений. Самый старый — механический, одна из наиболее известных разновидностей которого так называемый метод Давиденкова (предложен Давиденковым в начале 20-х годов прошлого века). Метод основан на удалении части материала. При удалении слоев, содержащих напряжения, баланс напряжений нарушается, в результате чего изделие коробится. Измеряя величину этого коробления, можно рассчитать уровень напряжений в удаляемых слоях.

В настоящее время метод применяется преимущественно для определения напряжений в поверхностных слоях изделий. Для этого интересующую нас поверхность электрохимически стравливают (остальные поверхности закрашены лаком), и в результате перераспределения напряжений деталь коробится. Замеряя с помощью тензодатчиков величину этого коробления, рассчитывают напряжения, действовавшие в удаленных слоях.

Данный способ считается одним из самых надежных. Однако он, по сути, является разрушающим. Кроме того, разрешающая способность метода по плоскости не слишком велика (разрешение по глубине, напротив, весьма хорошее).



**Рис. 11. Распределение сварочных остаточных напряжений:**

продольных в поперечных сечениях (а, б) и поперечных вдоль швов (в, г); а, б — соответственно в ферритных и мартенситных сталях (1 и 2 — возможные варианты); в — малая скорость сварки; г — большая скорость сварки

Еще один способ — рентгеновский, так называемый метод «синус квадрат пси». Основан на измерении смещения рентгеновских дифракционных линий, определении на основе этого величины де-

формации кристаллической решетки и расчете напряжений через модуль Юнга.

Имеются и другие физические методы, позволяющие в той или иной степени оценивать остаточные макронапряжения.

Для измерения микронапряжений в основном применяется рентгеновский метод, при котором напряжения определяются по уширению дифракционных линий (а не смещению, как для макронапряжений).

Сварочные деформации классифицируются по существу так же, как и напряжения. Дополнительно рассматривают упругие, пластические, свободные температурные и наблюдаемые (остаточные) деформации. Перечисленные связаны между собой следующим образом:  $\epsilon_{\text{упр}} + \epsilon_{\text{пл}} = \epsilon_{\text{набл}} + \epsilon_{\text{св}}$ . Для наблюдения свободных деформаций используют прибор, называемый дилатометром.

В целях уменьшения остаточных напряжений применяют сопутствующий подогрев при сварке, сварку в режимах, обеспечивающих меньшие скорости изменения температуры и меньшие температурные градиенты, послесварочную термообработку (высокий отпуск и отжиг), а также проведение после сварки поверхностной пластической деформации (ППД), для чего проводят обдувку дробью, обработку дисковыми щетками. Иногда помогает небольшая деформация путем обстукивания кувалдой или даже молотком. Однако рекомендовать последний способ не следует, так как его результаты весьма нестабильны и метод может быть опасным.

Снижению напряжений и деформаций способствует также уменьшение площади поперечного сечения шва (в основном за счет уменьшения ширины последнего), сварка многослойными и многопроходными швами, применение обратноступенчатых швов, симметричность швов и свариваемых узлов. Выполнение швов в определенной последовательности, допускающей свободную деформацию листов при сварке, также может способствовать снижению напряжений и в некоторых случаях деформаций (коробления).

Напротив, сварка заневоленных (зажатых) деталей способствует снижению сварочных деформаций, однако напряжения при этом могут возрастать. Таким образом, видно, что остаточные напряжения и деформации (коробление) не всегда простым образом связаны между собой.

### 2.3.8. Технологическая прочность

Под технологической прочностью понимается способность материала изделия переносить без разрушения производственные манипуляции. Применительно к сварке — это способность свариваться без образования трещин в момент сварки и сразу после нее (до начала эксплуатации).

Различают горячие и холодные трещины. Условной границей между ними считают температуру 200 °С.

Горячие трещины чаще всего образуются при температурах вблизи линии солидуса, в температурной области, в которой еще присутствует расплав, но его участки уже разделены закристаллизовавшимся металлом. При деформации возникают значительные гидростатические давления, разрывающие закристаллизовавшийся каркас, что и приводит к образованию трещин. Эта высокотемпературная зона пониженной стойкости к деформациям получила название температурный интервал хрупкости (ТИХ).

Так как трещины образуются при высоких температурах, при которых металл разрывается вязко, то горячие трещины плавные, довольно широкие, концы их закруглены, а поверхности окислены (рис. 12, а).

Появление при сварке или наплавке горячих трещин можно предсказать с помощью показателя Уилкинсона (Н.С.С):

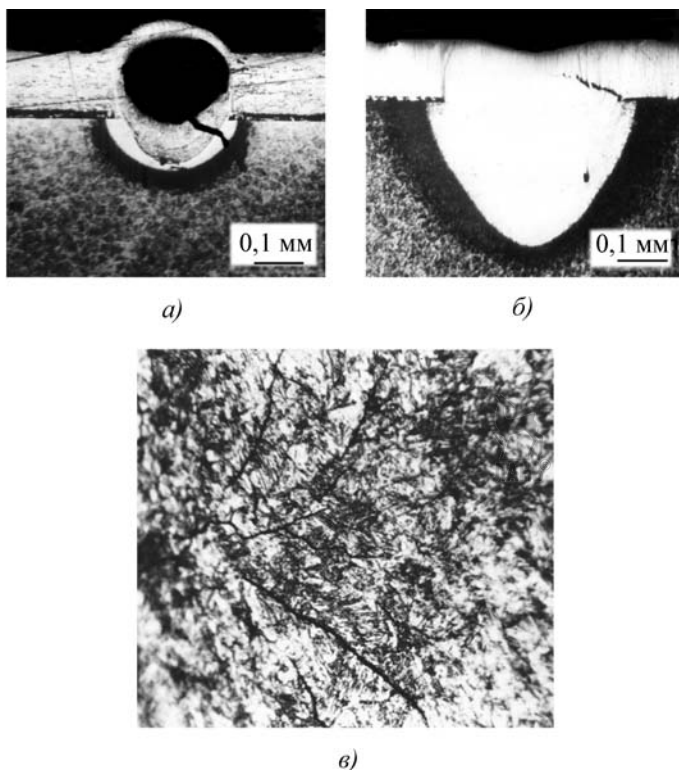
$$\text{Н.С.С.} = 1000\text{C}(\text{S} + \text{P} + \text{Si}/25 + \text{Ni}/100)/(3\text{Mn} + \text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}),$$

где С, S, P и пр. — содержание в стали соответствующих химических элементов, %.

Горячие трещины в сталях обычно появляются при  $\text{Н.С.С.} \geq 4$ , однако опасность их появления возникает уже при  $\text{Н.С.С.} \geq 2$ .

Холодные трещины образуются чаще всего при температурах, близких к 20 °С; довольно часто это имеет место даже не во время самой сварки, а при последующем вылеживании (чаще всего в течение первых суток).

Разрушение при образовании холодных трещин происходит по хрупко-вязкому механизму, потому холодные трещины узкие, ломаные, с острыми вершинами, не редко ветвящиеся (рис. 12, б, в). Поверхности их не окисленные (если трещины обнаружены сразу



**Рис. 12.** Горячая (а) и холодная (б) трещины в сварных точках, полученных импульсной лазерной сваркой (а: сварная точка дефектная — кроме трещины содержит каверну); поверхностные трещины (в)

после сварки и не было длительного коррозионного воздействия, разумеется).

Практически всегда упрочнение приводит к понижению пластичности. Потому вероятность образования холодных трещин в высокопрочных, нагартованных или закаленных сталях выше. Физико-химические макро- и микронеоднородности, крупное зерно, повышенное содержание вредных примесей также повышают склонность стали к образованию холодных трещин. Повышение твердости в результате сварочной подкалки увеличивает риск обра-

зования холодных трещин по этим же причинам. В первом приближении для оценки склонности металла к появлению холодных трещин часто используется углеродный эквивалент.

Различия в морфологии приводят к различиям в свойствах горячих и холодных трещин. Так как коэффициент концентрации напряжений зависит от остроты надреза, то напряжения в вершинах холодных трещин больше, и, соответственно, холодные трещины легче распространяются под действием внешних напряжений. С другой стороны, горячие трещины, как правило, более глубокие.

Важно уметь различать горячие и холодные трещины еще и потому, что меры предотвращения их возникновения различны. Так, послесварочная термообработка может помочь избежать появления холодных трещин. В то же время она совершенно бесполезна в отношении горячих трещин, которые образуются в процессе самой сварки, т.е. до начала любой послесварочной термообработки.

Методы исследования трещиностойкости материалов при сварке делятся на методы проб и машинные методы. *Пробы* — это специальные нормализованные детали, которые сваривают с последующим подсчетом либо числа трещин, либо суммарной длины трещин на единицу длины шва. Регулируя тот или иной параметр сварки, находят порог появления и исчезновения трещин. Этот порог и принимают за трещиностойкость данного материала при данном виде сварки. Например, кольцевая проба: выполняют кольцевой шов на листе. Напряжения увеличиваются с уменьшением радиуса окружности сварки. Окружность минимального радиуса еще без трещин принимают за критическую.

При *машинных методах* производят сварку изделия при непрерывном деформировании во время сварки. Скорость деформации, при которой начинают образовываться трещины, принимают за трещиностойкость к образованию горячих трещин.

Стойкость к образованию холодных трещин проверяют сваркой с последующей длительной выдержкой деталей под постоянной нагрузкой. Одни стали могут быть более стойки к горячим трещинам, тогда как другие — к холодным.

### 2.3.9. Свариваемость

Свариваемость материалов — их способность образовывать качественные сварные соединения. Различают физическую и технологическую свариваемость.

Под *физической свариваемостью* понимают способность материала сплавляться, образуя неразъемное соединение вне зависимости от конкретного способа сварки. Под *технологической свариваемостью* понимают возможность материала быть качественно сваренным тем или иным методом. В практических курсах под свариваемостью обычно понимают именно технологическую свариваемость, хотя, вообще говоря, граница между ними достаточно условна.

На свариваемость влияет много параметров. Так, физическая свариваемость двух различных материалов в значительной мере зависит от вида их диаграммы состояния. Очевидно, наилучшей свариваемостью обладают материалы с взаимной неограниченной растворимостью.

Однако при сварке плавлением часто хорошо свариваются и материалы без всякой взаимной растворимости. Связано это с тем, что в сварочной ванне образуется расплав типа механической смеси, и при кристаллизации на зернах каждого из материалов как на подложке из расплава будут преимущественно надстраиваться атомы того же самого материала. В результате переход от каждого материала к материалу шва не будет резким, а изменение свойств при переходе через шов будет плавным.

В то же время при сварке давлением в твердом состоянии свариваемость таких материалов будет уже плохой. Действительно, отсутствие взаимной растворимости исключает взаимодиффузию. При отсутствии жидкой ванны нет и перемешивания. В результате, сварное соединение будет представлять собой резкий переход одного материала в другой, т.е. стык будет являться гетерогенной границей с невысоким, как правило, комплексом механических свойств. Появление хотя бы ограниченной растворимости значительно улучшает свариваемость в твердом состоянии.

Материалы, образующие при сплавлении новые фазы, чаще всего имеют плохую свариваемость, так как эти фазы (химические соединения, интерметаллиды и т.п.) обычно твердые и хрупкие.

Первичная структура при сварке часто достаточно крупнозернистая и разнотернистая, подобные структуры обладают понижен-

ным комплексом механических свойств. Потому если материалы в твердом состоянии не претерпевают аллотропных превращений, то это также неблагоприятно для технологической свариваемости, так как отсутствует возможность исправить такую макроструктуру последующей термической обработкой.

**Влияние легирующих элементов на свариваемость.** Хром, молибден, ванадий и вольфрам ухудшают свариваемость за счет образования карбидов (могущих служить концентраторами напряжений) и за счет понижения критических скоростей закалки.

Содержание марганца до 1,5...2 % слабо влияет на свариваемость, при больших количествах незначительно ее ухудшает.

Никель увеличивает пластичность как исходной стали, так и шва. Поэтому он может способствовать улучшению свариваемости или, по крайней мере, не ухудшает ее.

Титан и ниобий в количестве до 1 % вводят в хромистые и хромоникелевые стали для улучшения свариваемости. В больших количествах они могут ухудшить свариваемость. Титан при этом способствует образованию горячих трещин.

Углерод до 0,25 % почти не оказывает влияния на свариваемость. При большем содержании ухудшает ее и значительно. При содержании кремния не более 0,3 % он не влияет на свариваемость, при больших количествах ухудшает ее.

**Классификация сталей по свариваемости.** По свариваемости материалы обычно подразделяют на 4 группы: хорошо, удовлетворительно, ограниченно и плохо сваривающиеся. Иногда вводят 5-ю: несваривающиеся (данном способом сварки).

Свариваемость в значительной степени зависит от эквивалентного содержания углерода (табл. 2).

**Эквивалентное содержание углерода**, или углеродный эквивалент стали, — это эмпирический параметр, с помощью которого оценивают свариваемость легированных сталей, приводя их к равноценным по свариваемости чисто углеродистым. Так как параметр этот эмпирический, то применяемые для его расчета формулы могут несколько различаться. Согласно ГОСТ 27772 используется следующая:

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Cr}}{5} + \frac{\text{Ni}}{40} + \frac{\text{Cu}}{13} + \frac{\text{V}}{14} + \frac{\text{P}}{2}.$$

## 2. Группы сталей по свариваемости

| Группа свариваемости | $C_{экв}$ , % | Примеры марок сталей                      | Условия сварки  |
|----------------------|---------------|---|---|
| Хорошая              | До 0,25       | Ст1...Ст4; 08...25; 15Г, 20Г, 20Х, 09ГС2  | Без подогрева и термообработки  |
| Удовлетворительная   | 0,25...0,35   | Ст5, 30, 35, 12Х1, 20ХГСА, 30Х            | Подогрев необходим только при сварке при $T_{окр}$ ниже $-5^{\circ}\text{C}$ и толщине стенки более 20 мм |
| Ограниченная         | 0,36...0,45   | Ст6, 40, 45, 45Г, 30ХГСА                  | Подогрев обязателен при любых условиях, желательна послесварочная термообработка                          |
| Плохая               | Свыше 0,46    | 50...85, 65Г, 9Х, У7...У13, Р18, ХГС, Х12 | Подогрев, отжиг, сварка по специальным технологиям. По возможности, надо избегать сварки вообще           |

Влияние легирующих элементов на свариваемость принимают аддитивным и линейным (коэффициенты в вышеприведенной формуле постоянны), что на самом деле не совсем верно. Поэтому анализ влияния легирования на свариваемость по эквивалентному содержанию углерода весьма приблизителен, однако позволяет оперативно оценивать возможность выполнения сварки.

Технологические факторы, ухудшающие свариваемость:

- резкое отличие материалов деталей по свойствам (химическому составу, теплофизическим параметрам, механическим свойствам);

- образование при сварке оксидов, пористости, газовых раковин;
- возникновение значительных напряжений;
- наличие геометрических дефектов (несплавлений, подрезов, резких переходов толщин изделия и т.п.).

Температуру подогрева ориентировочно можно определить по следующей эмпирической зависимости:  $T = 350(C'_{\text{экв}} - 0,25)^{0,5}$ , где  $C'_{\text{экв}}$  — приведенный углеродный эквивалент:  $C'_{\text{экв}} = C_{\text{экв}} \cdot (1 + 0,005\delta)$ , где  $\delta$  — толщина металла свариваемой детали, мм.

**Задача 6.** В машиностроении широко применяются конструкционные стали 45 и 40X, для изготовления труб для магистральных трубопроводов используют стали 09Г2С и 17ГС. Рассчитать эквивалентное содержание углерода в этих сталях (углеродный эквивалент) и сделать выводы.

**Решение**

Углеродный эквивалент можно рассчитать по следующей формуле (ГОСТ 27772):

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Cr}}{5} + \frac{\text{Ni}}{40} + \frac{\text{Cu}}{13} + \frac{\text{V}}{14} + \frac{\text{P}}{2},$$

где С, Мп, Si, Cr, Ni, Cu, V, P — содержание соответствующих легирующих элементов, % мас.

Зная примерный химический состав сталей (определяется по их марке, так называемый марочный состав), определим эквивалентное содержание углерода (см. ниже):

| Марка стали | Содержание элементов, % |    |    |    | $C_{\text{экв}}$ | Группа свариваемости |
|-------------|-------------------------|----|----|----|------------------|----------------------|
|             | С                       | Cr | Мп | Si |                  |                      |
| 20          | 0,20                    | —  | —  | —  | 0,20             | Хорошая              |
| 45          | 0,45                    | —  | —  | —  | 0,45             | Ограниченная         |
| 40X         | 0,40                    | 1  | —  | —  | 0,60             | Плохая               |
| 09Г2С       | 0,09                    | —  | 2  | 1  | 0,47             | Ограниченная         |
| 17ГС        | 0,17                    | —  | 1  | 1  | 0,38             | Ограниченная         |

Из полученных результатов видно, что хотя стали 40Х и 09Г2С содержат меньше углерода, чем стали 45 и 17ГС соответственно, эквивалентное содержание углерода в первых выше, а значит, свариваемость хуже. Эквивалентное содержание углерода в низкоуглеродистой низколегированной стали 09Г2С близко к среднеуглеродистой стали 45, по свариваемости они должны быть близки.

По эквивалентному содержанию углерода сталь 40Х можно отнести к группе сталей с плохой свариваемостью, сталь 20 — к хорошей, а стали 17ГС, 45 и 09Г2С — к ограниченной, причем 17ГС находится близко к границе с удовлетворительной, а 09Г2С — на границе с плохой.

Таким образом, для соединения деталей из стали 40Х сварку плавлением лучше не применять. Сваривать стали 45 и 09Г2С можно, в том числе и с помощью дуговой сварки, но при этом их обязательно надо подогревать, желательно подвергать послесварочной термообработке (высокому отпуску, лучше отжигу). Более низкое эквивалентное содержание углерода в стали 17ГС улучшает ее свариваемость, что в некоторых случаях позволяет отказаться от дополнительных технологических мер (подогрева и термообработки). Свариваемость стали 20 хорошая, и в дополнительных мерах при ее сварке нет необходимости.

## Глава 3

# ПРАКТИКА СВАРКИ

---

---

### 3.1. СВАРНЫЕ ШВЫ

#### 3.1.1. Классификация сварных соединений и швов

Основные типы сварных соединений приведены на рис. 13. Они включают стыковое, нахлесточное, угловое, тавровое (последнее иногда рассматривается как подвид углового) и торцовое. Соответствующие сварные швы носят те же названия.

По виду внешней поверхности сварные швы классифицируют на выпуклые, нормальные и вогнутые. По протяженности — на непрерывные и прерывистые. Детали могут соединяться отдельными сварными точками; если последних много и они располагаются в линию, то такое соединение называется точечным сварным швом.

Швы могут быть односторонними и двусторонними. По числу слоев и проходов они делятся на однопроходные, многослойные и многопроходные. По направлению действующего усилия — на

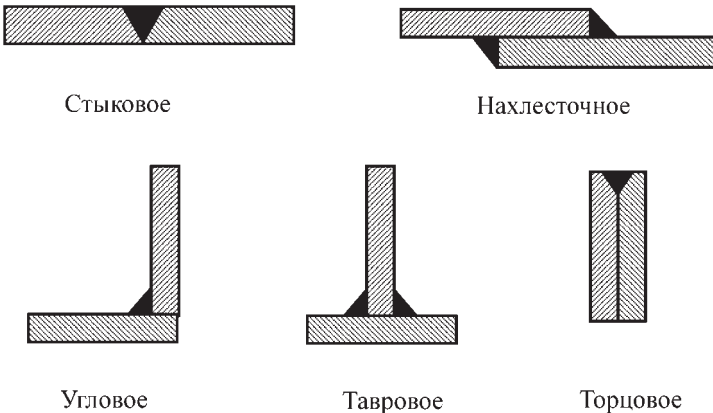


Рис. 13. Основные типы сварных соединений

продольные или фланговые (усилие параллельно шву), поперечные или лобовые (усилие перпендикулярно шву), косые и комбинированные (рис. 14).

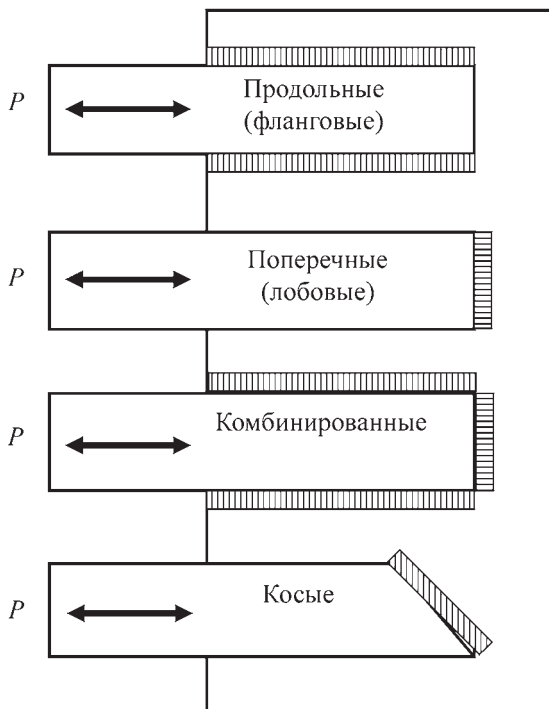


Рис. 14. Классификация сварочных швов по направлению действующего усилия

Часть шва, наиболее удаленная от его лицевой поверхности, называют корнем шва. Меньшую часть двустороннего шва называют подварочным швом.

По положению в пространстве швы делят на следующие группы:

- 1) нижние (в положении «на полу» и  $\pm 60^\circ$  от него);
- 2) вертикальные или горизонтальные (положение «на стене» и  $\pm 30^\circ$  от него);
- 3) потолочные (положение «на потолке» и  $\pm 60^\circ$  от него) (рис. 15).

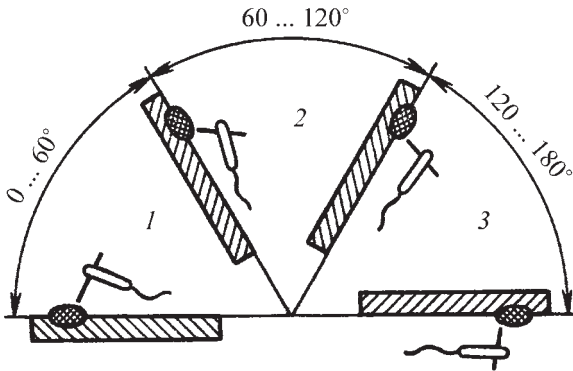


Рис. 15. Классификация сварных швов по положению в пространстве

Наиболее простыми для выполнения являются нижние сварные швы, наиболее сложными — потолочные, вертикальные и горизонтальные по сложности находятся между ними.

### 3.1.2. Основные геометрические параметры сварных швов

Основные геометрические параметры сварного шва приведены на рис. 16.

Для стыкового шва они включают толщину свариваемого металла  $s$ , ширину шва  $b$ , выпуклость шва  $a$ , глубину провара  $h$ , толщину шва  $t$  ( $t = h + a$ ), зазор  $c$ . Для углового шва: катет шва  $k$ , расчетную высоту шва  $p$ , толщину шва  $t$  и выпуклость шва  $a$ .

Коэффициент формы шва:  $K = b/t$ , коэффициент выпуклости шва:  $K_y = b/a$ .

### 3.1.3. Обозначения сварных швов на чертежах

На чертежах стандартные сварные швы изображают условно: видимые — одной сплошной линией, невидимые — штриховой (рис. 17).

Видимые сварные точки обозначают знаком  $+$ , невидимые не обозначаются. В поперечном сечении швы также рисуют основной сплошной линией. Реальные изображения швов (ширину шва в масштабе чертежа, изображение выпуклости шва, заполнение раз-

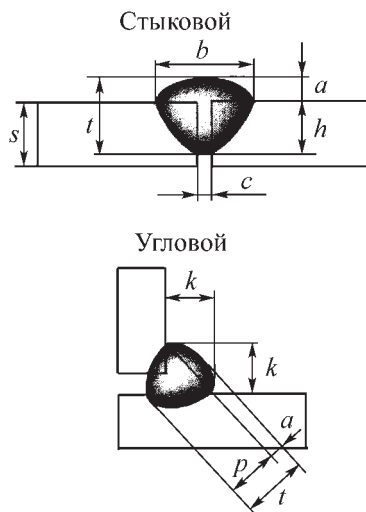


Рис. 16. Основные геометрические параметры швов

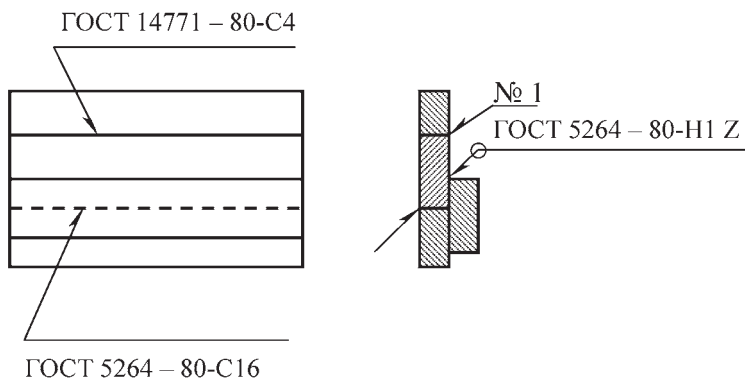


Рис. 17. Примеры обозначения сварных швов на чертежах

делки, изображения отдельных проходов и т.п.) выполняют только при сварке нестандартных швов. В этом случае границу шва обозначают сплошными основными линиями, а конструктивные элементы кромок — сплошными тонкими.

От изображения шва проводят линию-выноску, оканчивающуюся односторонней стрелкой. Условное обозначение шва пишется над полкой-выноской, проведенной к лицевой части шва, или под полкой-выноской, проведенной к оборотной стороне шва.

Полное обозначение шва включает наименование стандарта на данный шов, буквенно-цифровое обозначение шва по этому стандарту и условный графический знак особенностей шва (так, Z — прерывистый шов с шахматным расположением,  $\underline{\bigcirc}$  — шов со снятым усилением,  $\bigcirc$  — шов по замкнутому контуру, последний знак располагается в месте перехода линии выноски в полку-выноску). Буквенно-цифровое обозначение шва включает буквенный индекс типа шва (С — стыковой, У — угловой, Т — тавровый, Н — нахлесточный) и номер шва в данном конкретном стандарте.

Упрощенно сварные швы обозначаются линией-выноской с односторонней стрелкой, возможно, вместе с порядковым номером шва. В последнем случае типы швов указываются в технических условиях основной надписи чертежа или в таблице швов.

#### 3.1.4. Подготовка деталей к сварке, сварочно-монтажные работы

Самой первой операцией при сварке можно считать проверку свариваемых деталей, соответствия их требованиям технической документации. Если геометрия деталей или их стыка незначительно отличается от требуемой, то иногда можно провести правку последних. Не всегда эта правка допускается.

На свариваемых кромках не должно быть недопустимых дефектов. При наличии последних их нужно удалить, например, обрезкой торца.

Для того, чтобы обеспечить провар корня шва, когда толщина стенки изделия превышает глубину сварочной ванны, эту ванну нужно «опустить» в тело детали. Для этого на кромках выполняют специальную фаску (рис. 18). В этом случае говорят, что осуществили разделку кромок. Простейшая разделка состоит из односторонней фаски под углом 30...50° (если фаска выполнена только на одной из деталей, то такую разделку называют К-образной, если на обоих деталях, то У- или V-образной). Для предотвращения прожогов фаска не должна «сходить на ноль»: должен остаться не удаленным участок торца. Его называют притуплением.

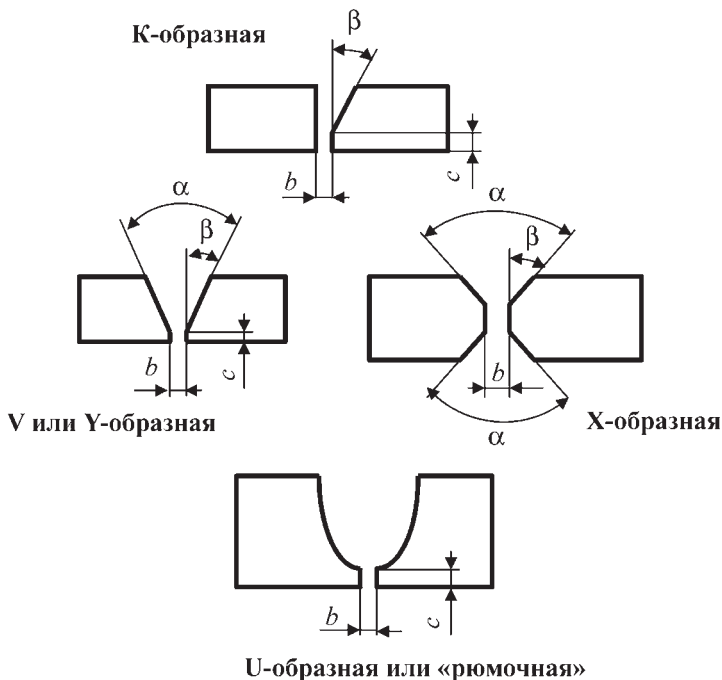


Рис. 18. Основные виды разделки кромок ( $b$  — зазор, 1...4 мм,  $c$  — притупление, 1...3 мм,  $\alpha$  — угол разделки кромок, 60...90°,  $\beta$  — угол скоса кромок, 30...50°)

Одностороннюю разделку выполняют, когда толщина стенок свариваемых деталей превышает 4...6 мм при односторонней сварке и 6...8 мм при двухсторонней. При меньших толщинах разделку обычно не производят.

Если толщина стенки превышает 15 мм, выполняют двухстороннюю разделку (X-образную), которая позволяет уменьшить объем наплавляемого материала и тем самым снизить тепловой вклад, уменьшить сварочные деформации и увеличить производительность. В последние годы для автоматической сварки иногда выполняют U-образную разделку, называемую иногда «рюмочной».

K-разделку делают для горизонтальных швов, причем без фаски остается нижний лист. Это делается в целях уменьшения стекания сварочной ванны.

Не все виды сварки требуют разделки кромок. Так, при КПЭ-сварке разделку, как правило, не производят. При сварке особо тонких листов делают не разделку, а напротив, отбортовку кромок. Это уменьшает опасность прожогов и дает большее количество расплава за счет плавления материала отбортовки.

Разделку кромок лучше осуществлять в заводских условиях. Следует по возможности избегать ручной разделки кромок на сварочном участке.

Вне зависимости от наличия или отсутствия разделки непосредственно перед сваркой осуществляют очистку свариваемых кромок от загрязнений, оксидов или гидрооксидов (ржавчины). Стали и черные металлы обыкновенно очищают механически (механическими или ручными проволочными щетками, абразивными кругами и т.п.). Цветные — как механически, так и травлением.

Очищать необходимо не только стык, но и прилегающие участки (обычно шириной до 15...30 мм). Последнее необходимо, чтобы избежать попадания в шов водорода, освобождающегося при разложении ржавчины.

Для таких видов сварки, которые требуют особо тщательно подготовленных свариваемых поверхностей (вакуумная сварка, холодная сварка давлением и т.п.), непосредственно перед сваркой проводят декапирование (удаление оксидных пленок травлением в слабых растворах кислоты), промывку органическими растворителями либо очистку в ультразвуковых ваннах.

Перед сваркой свариваемые детали желательно зафиксировать в сварочном приспособлении. Иногда их фиксируют короткими монтажными швами либо небольшими монтажными пластинами (прихватками), привариваемыми к каждой из них. После завершения сварки прихватки удаляют.

Перед сваркой детали часто собирают не впритык, а с некоторым зазором, который называют монтажным. Оптимальная величина зазора зависит от толщины свариваемых деталей и вида сварки. Для некоторых видов сварки зазор нежелателен. Так, зазор при лазерной сварке увеличивает опасность трещин. Без зазора ведут сварку и при некоторых новых видах дуговой автоматической сварки (в общем случае, чем больше плотность мощности в сварочной ванне, тем меньше зазор).

Очевидно, что нельзя провести монтаж изделия совершенно точно. В общем случае допускается смещение кромок не более четверти толщины свариваемой стенки, но не более 3 мм. При сварке ответственных конструкций, например при сварке магистральных газонефтепроводов, предел допустимого смещения уменьшают.

### 3.2. ДУГОВАЯ СВАРКА

Дуговой сваркой называется сварка плавлением, при которой в качестве источника теплоты используется электрическая дуга — сильноточный дуговой разряд в ионизированной смеси газов, паров металлов и компонентов покрытий электродов и флюсов.

Дуговую сварку неплавящимся электродом впервые осуществил российский изобретатель-самоучка Николай Николаевич Бенардос в 1881 г. (идея применить электрическую дугу для сварки высказывалась и до него, но удачных практических попыток не было). На сварку Бенардос получил российский патент от 1886 г., в период 1885—1887 гг. получены патенты Франции, Великобритании, Германии, Испании, Бельгии, США, Швеции, Австро-Венгрии, Норвегии, Швейцарии.

Сварка плавящимся электродом была разработана и впервые внедрена в производство директором Пермского оружейного завода Николаем Гавриловичем Славяновым в 1888 г. (патенты России, Германии, Великобритании, Франции, Австро-Венгрии и Бельгии получены в 1890—1891 гг.). Славянов же спроектировал и первые сварочные электромеханические генераторы (в качестве источника тока Бенардос применял гальванические элементы).

Впрочем, первенство Славянова Бенардос оспаривал. Действительно, первые опыты сварки металлическими электродами он произвел раньше Славянова, однако преимущественно все же производил сварку неплавящимися угольными электродами и именно такую сварку демонстрировал общественности.

Многие современные черты электросварки, сварочного оборудования были предложены уже Бенардосом и Славяновым (разделка кромок под сварку, подогрев, использование флюса, светофильтры и сварочные маски и многое, многое другое, даже автоматические сварочные головки были впервые спроектированы уже Н.Г. Славяновым).

После смерти изобретателей дуговая сварка в России, как у нас водится, была заброшена, и в промышленном масштабе в нашей стране возобновилась уже только в 1920 г., когда инженер Валентин Вологдин во Владивостоке начал ее применять при строительстве судов, паровых котлов и нефтяных резервуаров.

За рубежом, особенно в США и Великобритании, электросварка в те годы активно развивалась. Сейчас там ее изобретателем считают Джоржа Лоу, купившего несколько сварочных аппаратов у Н.Г. Славянова и начавшего ими торговать. Имена Н.Н. Бенардоса и Н.Г. Славянова забыты везде, кроме России, впрочем, как и то, что сам дуговой разряд был открыт русским физиком Василием Владимировичем Петровым еще в 1802 г.

### 3.2.1. Виды дуговой сварки

Существует несколько видов дуговой сварки. В первую очередь, ее подразделяют:

*по типу используемых электродов:*

- сварка неплавящимся электродом;
- сварка плавящимся электродом,

*по току:*

- сварка на переменном токе;
- сварка на постоянном токе, которая в свою очередь делится

на сварку на:

- прямой полярности («+» на детали);
- обратной полярности («-» на детали).

В целом сварка на переменном токе, как правило, хуже, чем на постоянном. Однако она широко применяется из-за простоты, дешевизны, долговечности и надежности сварочного оборудования.

По *технологическим особенностям и степени автоматизации* сварку подразделяет на ручную, полуавтоматическую (механизированную) и автоматическую. По *защите сварочной ванны* на сварку под флюсом, в вакууме и с газовой защитой.

Производительность автоматической сварки под флюсом в 5–10 раз выше, чем ручной сварки, а при форсированных режимах в 15–20 раз выше. Качество сварки под флюсом также выше, чем при ручной дуговой сварке штучными электродами за счет более постоянных условий сварки и лучшей защиты сварочной ванны.

Качество сварки в защитных газах сопоставимо с качеством сварки под флюсом (поверхность шва, полученная с газовой защитой, чище, неметаллических включений меньше, но дегазация хуже, нет раскисления).

Чаще всего дуговая сварка производится одним электродом в одну ванну. Однако существует многоэлектродная и многодуговая сварка (при многоэлектродной все электроды присоединены к одному источнику, при многодуговой каждый из них подключен к своему источнику. Многодуговая сварка может быть в одну или в отдельные сварочные ванны. Использование многоэлектродных и особенно многодуговых сварок увеличивает производительность. Чаще всего многодуговую сварку применяют при сварке трехфазной дугой.

Дуговой разряд можно использовать и для резки. В простейшем случае применяют обычный сварочный аппарат и те же электроды, просто до предела поднимая сварочный ток. Однако такой способ приводит к перерасходу электродов, низкой производительности резки и крайне низкому качеству реза из-за большого количества плохо удаляемого расплава. Потому такой способ резки рекомендовать нельзя.

Можно, однако, сдувать образующийся расплав сжатым воздухом. На этом основана так называемая воздушно-дуговая резка. Качество реза и производительность при воздушно-дуговой резке достаточно высокие.

Для воздушно-дуговой резки выпускаются специальные резаки, объединяющие неплавящийся электрод в держателе и воздушное сопло, к которому подводится сжатый воздух.

### 3.2.2. Сварочное оборудование

Комплект технологического оборудования, необходимого для организации сварки, называется *сварочным постом*. Сварочные посты бывают *стационарными* и *переносными*.

Часть поста, непосредственно служащего для проведения ручной дуговой сварки, называется *сварочным аппаратом*. Последний включает источник питания, сетевую кабель, два сварочных кабеля (один от источника питания к электроду, другой — к детали), электрод, электрододержатель и токоподводящий зажим детали. Сече-

ние кабелей должно быть таким, чтобы плотность тока в них не превышала  $5...7 \text{ А/мм}^2$ .

Для проведения сварки в защитных газах необходима также подсистема газовой защиты, которая обычно состоит из баллона с защитным газом, газового редуктора, подводящего шланга и системы напуска (сопла, возможно, защитной камеры), а также системы контроля.

Основной частью сварочного автомата является *сварочная головка* — электромеханическое устройство, осуществляющее подачу электрода, подвод к нему сварочного тока, поддержание устойчивости процесса, а также операции зажигания и гашения дуги. Сварочная головка может тем или иным способом перемещаться, но может быть и закреплена неподвижно. В последнем случае перемещаются свариваемые детали.

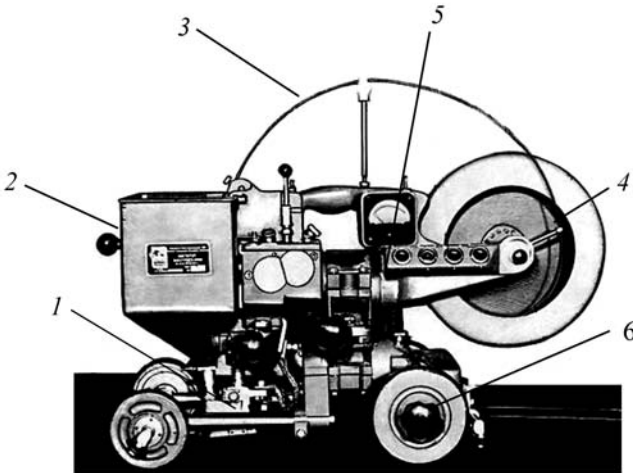
Если сварочная головка закреплена на специальной самодвижущейся тележке, то такое устройство называют *сварочным трактором* (рис. 19).

Основные компоненты сварочного трактора:

- механизм перемещения (каретка);
- механизм подачи проволоки (кассета с проволокой, правильный механизм, подающие ролики, привод и т.п.);
- флюсоаппарат (бункер, дозатор и т.п.);
- токоподводящий мундштук;
- источник питания;
- блок управления.

Если в сварочном аппарате механизирована только подача проволоки, а перемещение сварочной головки осуществляется вручную (для облегчения этого она может быть подвешена), то такие аппараты называют *шланговыми*.

Расстояние между мундштуком (зоной подвода тока) и деталью постоянно, потому при автоматической сварке сварочный ток более стабилен, чем при ручной. Металл шва хорошо защищен от окисления кислородом воздуха, а слой расплавленного флюса уменьшает скорость охлаждения. Плотность тока в 3–5 раз больше, чем при ручной сварке, что приводит к большей производительности, большему проплавлению и уменьшению доли наплавленного металла за счет увеличения доли основного металла. Скорость сварки сварочными тракторами доходит до 300 м/ч (при многодуговых аппаратах).



**Рис. 19. Сварочный трактор:**

1 — сварочная головка (включает устройство дозирования и подачи флюса, привод подачи проволоки, мундштук для подачи тока на проволоку); 2 — бункер для флюса; 3 — электродная проволока; 4 — катушка с проволокой; 5 — пульт управления; 6 — ходовая тележка (каретка)

**Задача 7.** Подобрать сварочный кабель к сварочному аппарату, обеспечивающему максимальный рабочий сварочный ток 200 А. Типовые кабели имеют сечение токопроводящих жил 25; 35, 50 и 70 мм<sup>2</sup>.

#### Решение

Известно, что ток в сварочном кабеле не должен превышать 5...7 А/мм<sup>2</sup>. Отсюда сечение кабеля для источника в 200 А должно быть не менее  $S = I/j = 28,6...40$  мм<sup>2</sup>. Стандартное значение, попадающее в указанный диапазон, составляет 35 мм<sup>2</sup>. Таким образом, останавливаемся на кабеле с сечением 35 мм<sup>2</sup>.

### 3.2.3. Источники питания сварочной дуги

В качестве сварочных источников питания переменного тока чаще всего применяют специальные сварочные трансформаторы. Они бывают однофазными и трехфазными.

Применяют трансформаторы:

- с повышенным магнитным рассеянием;
- с нормальным магнитным рассеянием и дросселем.

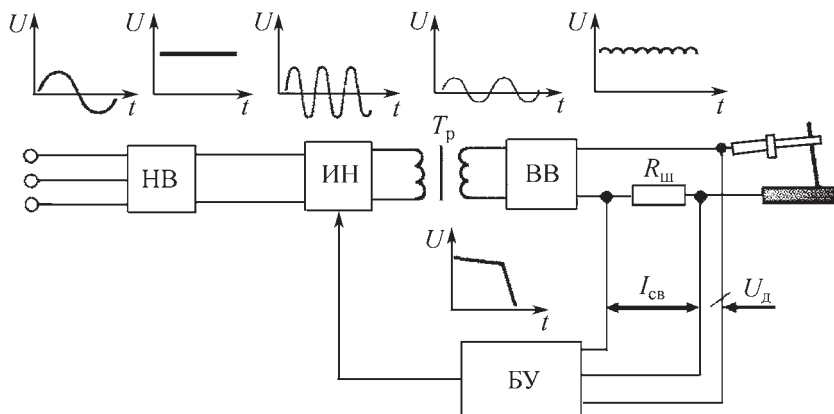
При использовании трансформаторов первого типа характеристика и ток сварки регулируют изменением магнитного потока через рабочую часть сердечника. Наиболее часто это делают с помощью магнитных шунтов, а в маломощных трансформаторах — путем изменения магнитного сопротивления сердечника при механическом перемещении специального якоря (последний способ применяется все реже, так как на этот якорь действуют большие механические усилия, что снижает надежность и ресурс сварочного аппарата).

Для сварки на постоянном токе применяют сварочные выпрямители (необходимо учитывать, что хотя весь источник часто называют сварочным выпрямителем, на самом деле он включает и сварочный трансформатор, и собственно сварочный выпрямитель).

Сварочные выпрямители бывают нерегулируемыми (на диодах) и регулируемыми (на тиристорах). Для формирования штыковой характеристики и сварки на малых токах также применяют и транзисторные регуляторы.

Все более широкое распространение находят инверторные источники. Схема простейшего инверторного источника приведена на рис. 20. Эти источники представляют собой электронные генераторы повышенной частоты, питаемые прямо от сети через сетевой трансформатор с коэффициентом трансформации 1:1, и сетевой выпрямитель (трансформатор необходим в целях безопасности для гальванической развязки с сетью). Выходное напряжение генератора понижается выходным высокочастотным трансформатором, выпрямляется и через блок формирования сварочной характеристики поступает на выходные клеммы. Требуемая сварочная характеристика может формироваться и непосредственно выпрямителем. В последнем случае применяется регулируемый тиристорный выпрямитель, обычно работающий в режиме ШИМ (широтно-импульсной модуляции).

Известно, что повышение рабочей частоты приводит к улучшению массогабаритных характеристик трансформаторов и фильтров. Трансформаторы с коэффициентом трансформации 1:1 также более компактны. Таким образом, применение схемы инвертора приводит к снижению массы и размеров сварочного аппарата, а в будущем, вероятно, и его стоимости (цена на медь постоянно повышается, а цена электроники снижается).



**Рис. 20. Упрощенная блочная схема инверторного источника питания:**

НВ — низкочастотный выпрямитель; ИН — инвертор; Тр — трансформатор; ВВ — высокочастотный выпрямитель; Rш — шунт; БУ — блок управления

Также, подобные сварочные аппараты могут иметь очень гибко регулируемую сварочную характеристику. Действительно, обратная связь по напряжению приводит к формированию «жесткой», почти горизонтальной характеристики, источник работает в так называемом режиме «источника напряжения». А обратная связь по току обуславливает крутопадающую, почти вертикальную характеристику, т.е. образуется так называемый «источник тока». Таким образом, изменяя параметры обратной связи, можно в широких пределах регулировать форму нагрузочной характеристики источника (сварочной характеристики).

В прошлом достаточно широкое применение находили электромашинные сварочные преобразователи, состоявшие из соединенных муфтой вал в вал электромеханического генератора и асинхронного электродвигателя. Для сварки в полевых условиях для вращения генераторов применялись двигатели внутреннего сгорания. Тип генераторной электромашинки зависел от вида сварки. Так, для сварки на постоянном токе применялся коллекторный генератор, выдававший на выходных клеммах сразу постоянный ток.

В настоящее время электромашинные генераторы применяют почти исключительно только для сварки в полевых условиях, причем в качестве

привода чаще всего используют дизель (так называемый дизель-генератор). Коллекторные генераторы постоянного тока также не используют, вместо них применяют асинхронные, работающие на полупроводниковый выпрямитель.

### 3.2.4. Основные технические требования к источникам питания

Очевидно, что для обеспечения стабильности сварочного режима при изменении напряжения на дуге (например, из-за изменения длины дуги) сварочный ток не должен сильно меняться. Это требование удовлетворяется за счет крутизны характеристики источника и рассмотрено ранее в п. 2.2.5. Кроме того, к источнику питания предъявляются также *следующие требования*.

Напряжение холостого хода  $U_0$  должно превышать напряжение зажигания дуги  $U_3$ . Источник должен обеспечивать некоторый запас по току, т.е. ток короткого замыкания (максимальный ток, отдаваемый источником) должен превышать рабочий сварочный ток. Обычно удовлетворяют следующее неравенство:  $1,25 < I_{к.з} / I_p < 2$ . Если величина тока короткого замыкания будет слишком близка к сварочному току, то сварка может быть нестабильной; если слишком большой, то возможны перегрев электродов, обгорание покрытия, перегрев источника.

Источник питания должен достаточно быстро реагировать на изменения рабочего режима, и время изменения тока от тока короткого замыкания до рабочего, называемое *временем восстановления*, не должно превышать определенной величины (обычно не более 30 мс, но, как правило, чем оно меньше, тем лучше).

Сварочный ток у источников можно регулировать ступенчато, плавно или комбинировано. Причем при регулировке тока напряжение холостого хода  $U_0$  не должно сильно меняться.

Сварочные источники не обладают 100%-ным КПД, и потому при работе греются, причем неравномерно. При чрезмерном нагреве возможен выход источника из строя.

Очевидно, что во время пауз источник охлаждается. Чем больше доля пауз, тем больший нагрев допустим между ними и, следовательно, источник может кратковременно работать при большей мощности. А при той же мощности и более длительных паузах можно применять менее мощный источник.

Относительную длительность пауз в работе обозначают через ПВ, ПН или ПР (продолжительность включения, нагрузки и работы соответственно):  $PВ = (t_{cb} / t_{cb} + t_{п}) 100 \%$ . Говоря о мощности источника, всегда указывают, какому значению ПВ она соответствует.

Обычно для профессиональной ручной дуговой сварки применяют аппараты с ПВ порядка 60 %. Для непрофессиональных (бытовых) сварочных аппаратов ПВ может составлять 20 %. Для автоматической сварки обычно — 100 %.

Один и тот же источник для разных токов может иметь разные ПВ и наоборот. Ориентировочно  $I_i = I_{ном} \sqrt{PВ_{ном} / PВ_i}$ .

### 3.2.5. Сварочные материалы

К сварочным материалам относят материалы, расходуемые при проведении сварки. К ним относят: электроды, сварочную проволоку, флюсы и защитные газы.

Дуговая сварка плавящимся электродом осуществляется либо с помощью относительно коротких стержней — штучных электродов, либо применяется проволока в бухтах. Электроды преимущественно используют при ручной сварке, сварочную проволоку — при автоматической сварке (если диаметр электродов большой, то автоматическую сварку могут вести и штучными электродами).

**Плавящиеся электроды** изготавливают из низкоуглеродистой проволоки с пониженным содержанием вредных примесей. Применяют электроды и из легированных и сильнолегированных сталей. Для получения высокопрочных и вязких сварных швов даже при сварке неаустенитных сталей могут применяться аустенитные электроды. Стержни таких электродов изготавливаются из коррозионно-стойких аустенитных сталей типа 08X18H10 и даже еще более легированных.

Штучные электроды выпускаются диаметром от 0,3 до 12 мм, но наиболее распространены от 2 до 5 мм. Электроды покрыты специальным покрытием — обмазкой. Назначение этого покрытия — стабилизация дуги, защита расплава от газов воздуха, раскисление металла сварочной ванны, дополнительное его легирование.

В состав покрытия входят следующие компоненты:

- газообразующие — неорганические вещества (мрамор  $CaCO_3$ , магнезит  $MgCO_3$  и др.), органические вещества (крахмал, целлюлоза, мука и др.);

- шлакообразующие, составляющие основу покрытия — обычно это руды (марганцевая, титановая), минералы (ильменитовый и рутиловый концентраты, полевой шпат, кремнезем, гранит, мел, плавленый шпат и др.);
- легирующие элементы и элементы-раскислители — ферросплавы (сплав железа с кремнием, марганцем, титаном и др. элементами), порошок алюминия;
- связующие компоненты (обычно натриевое или калиевое жидкое стекло);
- пластифицирующие добавки (каолин, декстрин, бетонит и др.).

По *типу покрытия* электроды делят на следующие группы: А — кислые; Б — основные; Р — рутиловые; Ц — целлюлозные; П — прочие; Ж — в обмазку добавлен железный порошок для улучшения зажигания дуги и повышения коэффициента наплавки («целлюлозное покрытие» означает, что в обмазку добавлен порошок целлюлозы для улучшения защиты шва за счет газов, образующихся при ее сгорании).

Электроды с кислым и целлюлозным покрытием при сварке создают значительное количество газов за счет разложения органических компонентов; эти газы и защищают шов. Основные покрытия осуществляют газовую защиту за счет разложения мрамора, а оксид кальция и другие компоненты создают основной шлак. Рутиловые электроды осуществляют защиту шлаками на основе  $TiO_2$ , полевого шпата; газовую защиту — за счет разложения магнезита.

С некоторым упрощением можно сказать, что наивысшее качество сварки обеспечивают электроды с основным и особенно рутиловым покрытием, а наибольшую производительность — электроды типа Ж (последние, однако, из-за большой сварочной ванны не могут быть использованы при сварке в потолочном положении). Недостаток электродов с основным покрытием — более низкая устойчивость дуги.

Целлюлозные электроды дают мало шлака и потому удобны при выполнении корневого прохода. Электроды с кислым покрытием по качеству сварки и производительности занимают промежуточное положение, при том, что их сварочные аэрозоли наиболее вредные и потому в настоящее время почти не выпускаются.

Пары воды, выделяющиеся при сварке из покрытия, приводят к наводораживанию расплава, потому перед сваркой электроды не-

обходимо прокалывать. После прокалики электроды допускается использовать в течение двух суток при условии, что они находились в подогреваемом пенале, после чего необходима повторная прокатка (допускается до пяти прокалок). Электроды упакованные в герметические металлические банки или пленочную вакуумную упаковку прокалики перед использованием не требуют (при условии целостности упаковки).

**Сварочная проволока** может быть голой, обмедненной (для улучшения токоподвода) или полый, заполненной флюсом (последнюю называют самозащитной). Работать самозащитной проволокой удобнее, но защита сварочной ванны при этом несколько хуже (о причинах ниже).

Эффективность использования штучных электродов и сварочной проволоки, а также производительность сварки характеризуют коэффициентом наплавки, выражающим массу металла, наплавленного за один час и отнесенного к одному амперу сварочного тока:  $\alpha_n = G_n / I_{св} t$ .

При ручной дуговой сварке  $\alpha_n$  обычно составляет 7...10 г/А·ч, повышаясь до 11...15 г/А·ч для электродов с железным порошком в покрытиях. При автоматической и полуавтоматической сварке типичные значения 18...25 г/А·ч.

Сам темп плавления электродов и проволоки описывают коэффициентом расплавления:  $\alpha_p = G_p / I_{св} t$ , где  $G_p$  — масса расплавленного электродного металла.

Количество наплавленного металла меньше расплавленного из-за потерь на разбрызгивание и на угар. Коэффициент потерь  $\alpha_{п} = (\alpha_p - \alpha_n) / \alpha_p$ .

**Неплавящиеся электроды** изготавливают из вольфрама, графита или угля (пересованного кокса). Последние самые дешевые, но имеют малую стойкость, малую электропроводность, затрудняющую работу на больших токах, могут приводить к загрязнению шва неметаллическими включениями и потому в настоящее время применяются ограниченно.

Вольфрамовые электроды быстро расходуются при сварке на обратной полярности, и поэтому применять их в таком режиме нежелательно. Повышенный расход наблюдается также при прямом касании свариваемой поверхности, в связи с чем при сварке вольфрамовым электродом дугу желательно зажигать на вспомога-

тельной графитовой пластине или обеспечивать пробой разрядного промежутка токами высокой частоты.

Для повышения устойчивости дуги вольфрамовые электроды лантанируют (добавляют до 2 % оксида лантана) или торируют (добавляют оксид тория). Оксид тория, однако, слабо радиоактивен.

**Флюсы.** В настоящее время при дуговой сварке существует три основных способа применения флюсов. Первый — это просто посыпать зону сварки толстым слоем флюса, внутри которого и будет гореть дуга и расплавлять этот флюс. Так происходит при автоматической сварке под флюсом. Защита сварочной ванны при этом способе наиболее хорошая.

Второй способ — флюс нанести на поверхность стержня штучного электрода. При плавлении последнего флюс плавится и стекает на поверхность ванны. Так происходит при ручной сварке. Степень защиты металла в этом случае несколько хуже.

Третий способ — порошковый флюс находится во внутренней полости сварочной, так называемой самозащитной, проволоки. Степень защиты при этом несколько ниже, чем в первых двух. Обусловлено это тем, что расплавленный металл попадает в ванну через воздушный промежуток, не защищенный флюсом (поток расплавленного флюса внутри, а металлическая оболочка проволоки плавится и стекает снаружи!).

Флюсы получают сплавлением составляющих его компонентов и последующим дроблением (плавленные флюсы) или связыванием (склеиванием) порошкообразных компонентов также с последующим измельчением (неплавленные или керамические флюсы).

Плавленные флюсы бывают стекловидными и пемзовидными. Добавлением железного порошка получают магнитные флюсы. В магнитном поле сварочного тока такие флюсы обволакивают сварочную проволоку. Это позволяет производить сварку в вертикальном положении и вести наблюдение за процессом, как при сварке покрытыми электродами.

Недостаток керамических флюсов — их большая гигроскопичность, что требует прокалки перед сваркой. В то же время отсутствие нагрева при изготовлении позволяет более гибко регулировать их состав. Разработаны керамические флюсы такой высокой восстанавливающей способности, что позволяет вести сварку по ржавым кромкам.

Флюсы должны обеспечивать легкую отделяемость шлака и минимальное количество вредных газов и пыли, выделяющихся при сварке.

В качестве *защитных газов* используют аргон, гелий, углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), газовую защиту меди можно производить азотом.

Все эти газы не имеют ни цвета, ни запаха. Поставляются в металлических баллонах, окрашенных в соответствующий цвет (черный для азота и углекислого газа, серый для аргона, коричневый для гелия) и снабженных соответствующей надписью на баллоне. Углекислый газ находится в баллонах в сжиженном состоянии, остальные газы — в сжатом.

### 3.2.6. Выбор основных параметров дуговой сварки

*Основные параметры* дуговой сварки:

- тип шва и положение его в пространстве;
- род и полярность тока;
- тип, диаметр электрода или проволоки;
- величина сварочного тока и напряжение на дуге;
- скорость сварки;
- положение электрода;
- наличие и температура сопутствующего подогрева и после-сварочной термообработки.

Тип шва обыкновенно задает конструктор изделия, и сварщик-технолог может изменить его только по согласованию. При возможности проводить ориентацию изделия в пространстве следует предпочесть сварку в нижнем положении и избегать потолочной сварки.

Вид сварки выбирают исходя из технико-экономических соображений при обработке изделия, и в производственных условиях редко идут на его кардинальное изменение.

При дуговой сварке вид тока также выбирают из технико-экономических соображений (сварочные установки переменного тока дешевле), степени ответственности изделия (сварка на постоянном токе, как правило, качественнее; с другой стороны, при сварке на переменном токе можно избежать магнитного дутья).

Полярность зависит от используемых сварочных материалов — как правило, сварку необходимо осуществлять на той полярности,

на которую последние рассчитаны (это всегда указывается в их сопроводительной документации). Большинство современных плавящихся электродов предназначены для сварки на обратной полярности. Сварка неплавящимися электродами практически всегда ведется на прямой полярности, так в противном случае происходит быстрое разрушение электродов.

При однопроводной сварке оптимальный диаметр электрода примерно равен толщине стенки свариваемых изделий. Однако, как правило, не следует принимать его меньшим 1,5...2 мм и большим 8 мм при сварке в нижнем положении, 5 и 4 мм для вертикальной и потолочной сварки соответственно. Чаще всего диаметр электродов находится в диапазоне 2...4 мм.

При прочих равных условиях количество наплавляемого металла пропорционально сварочному току:

$$G = \alpha_n I_{св} t,$$

где  $\alpha_n$  — коэффициент наплавки;  $I_{св}$  — сварочный ток;  $t$  — время. Таким образом, чем больше сварочный ток, тем больше производительность сварки.

Однако с увеличением тока до значений выше оптимального для данного диаметра электрода последний перегревается, что снижает качество сварки, увеличивается разбрызгивание и опасность прожога.

При недостаточном токе дуга неустойчива, также может возникнуть разбрызгивание и увеличивается опасность непроваров и несплавлений.

При ручной дуговой сварке сварочный ток устанавливают из расчета:

$$I_{св} = Ckd_3,$$

где  $d_3$  — диаметр электрода, мм;  $k$  — коэффициент, зависящий от пространственного положения шва (0,8 для потолочного, 0,9 для вертикального и 1,0 для нижнего), а коэффициент  $C$  зависит от диаметра электрода (25...30; 30...45 и 45...60 для электродов диаметром 1...2, 3...4 и 5...6 мм соответственно).

Для электродов диаметром 3...6 мм также можно применять формулу

$$I_{св} = (20 + 6d_3)kd_3.$$

Для более точного расчета надо учитывать тип покрытия электрода.

При автоматической сварке сварочный ток устанавливают:

$$I_{\text{св}} = (80 \dots 100)h_1,$$

где  $h_1$  — расчетная глубина проплавления.

При односторонней сварке за глубину проплавления принимают толщину свариваемого металла. При двусторонней сварке без зазора, без разделки кромок  $h_1 = (0,6 \dots 0,7)\delta$ . При сварке с разделкой кромок и зазором расчетную глубину проплавления принимают:

$$h_1 = H - \frac{F_{\text{н}}}{0,73b},$$

где  $F_{\text{н}}$  — площадь наплавки, равная сумме площадей зазора, разделки и выпуклости шва.

Диаметр сварочной проволоки выбирают исходя из допустимой плотности тока в ней:

$$d_{\text{э}} = 1,13\sqrt{(I_{\text{св}} / j)},$$

где  $j$  — допустимая плотность тока.

Допустимая плотность тока в сварочной проволоке сплошного сечения и коэффициент  $A$  в зависимости от диаметра электрода приведены ниже.

|                                       |          |         |         |         |         |
|---------------------------------------|----------|---------|---------|---------|---------|
| $d_{\text{э}}$ , мм . . . . .         | 2        | 3       | 4       | 5       | 6       |
| $j$ , А/мм <sup>2</sup> . . . . .     | 65...200 | 45...90 | 35...60 | 30...50 | 25...45 |
| $A \cdot 10^{-3}$ , А · м/ч . . . . . | 8...12   | 12...16 | 16...20 | 20...25 | 25...30 |

Напряжение на дуге:

$$U_{\text{д}} = 20 + \frac{0,05}{\sqrt{d_{\text{э}}}} I_{\text{св}} \pm 1.$$

Скорость сварки выбирается такой, чтобы сварочная ванна заполнялась электродным металлом и несколько возвышалась над

поверхностью кромок с плавным переходом к основному металлу без подрезов и наплывов. Обычно определяется по соответствующим таблицам или графикам и уточняется экспериментально. Ориентировочно можно принять:

$$v_{\text{св}} = A/I_{\text{св}}.$$

Полученные режимы сварки подвергаются поверочному расчету через определение погонной энергии, коэффициента формы шва и геометрических параметров шва, которые сравниваются с исходными.

Существуют и другие методики инженерного расчета режимов автоматической сварки. В последние годы в этих целях все чаще применяют компьютерное моделирование.

**Задача 8.** Необходимо выполнить сварку горизонтального стального резервуара вместимостью 50 м<sup>3</sup>. Толщина листов 5 мм. Применяется ручная дуговая сварка.

Выбрать диаметр электрода и рассчитать сварочный ток. Определить необходимость и тип разделки кромок.

#### Р е ш е н и е

Так как резервуар горизонтальный, то при сварке на его стенках будут участки с самыми разными пространственными положениями швов: нижним, вертикальным и потолочным.

При ручной дуговой сварке встык листов толщиной 2...6 мм диаметр электрода рекомендуется выбирать близким или равным толщине свариваемых деталей. Однако максимальный диаметр электродов при потолочной сварке 4 мм. Потому останавливаемся на электродах такого (4 мм) диаметра.

При ручной дуговой сварке сварочный ток  $I_{\text{св}} = Ckd$ , в зависимости от пространственного положения шва  $k = 0,8$  (для потолочного),  $0,9$  (для вертикального),  $1,0$  (для нижнего), для электродов диаметром  $3...4$  мм  $C = 30...45$ .

Отсюда при сварке в потолочном положении оптимальный сварочный ток  $I_{\text{св}} = 95...145$  А, в вертикальном  $I_{\text{св}} = 110...160$  А, в нижнем  $I_{\text{св}} = 120...180$  А. Ток  $120...145$  А будет попадать в оптимальные диапазоны сварочных токов при всех пространственных положениях шва, и потому его можно считать оптимальным для выполнения данной работы.

Толщина свариваемых листов в нашем случае меньше 6 мм, потому разделку кромок можно не проводить.

**Задача 9.** Рассчитать режимы автоматической сварки под флюсом днища резервуара, выполняемого из листов толщиной 4 мм. Определить необходимость разделки кромок. Рассчитать потребную мощность источника питания.

#### Решение

Так как толщина листов менее 6 мм, то разделку кромок не производим. Учитывая, что при сварке днища свободный доступ имеется только с одной стороны, сварку будем вести односторонним швом в один проход (поскольку толщина листа невелика).

Оптимальный сварочный ток при автоматической сварке  $I_{\text{св}} = (80 \dots 100)h_1$ , где  $h_1$  — расчетная глубина проплавления. При односторонней однопроходной сварке без разделки кромок  $h_1 = s$ , где  $s$  — толщина свариваемых деталей. Таким образом, в нашем случае  $I_{\text{св}} = 320 \dots 400$  А.

Диаметр сварочной проволоки выбираем исходя из допустимой плотности тока:

$$d_3 = 1,13\sqrt{(I_{\text{св}} / j)},$$

где  $j$  — допустимая плотность тока (для проволоки диаметром до 2 мм  $j = 65 \dots 200$  А).

Отсюда диаметр сварочной проволоки 1,43...2,8 мм. Останавливаемся на сварочной проволоке диаметром 2 мм.

Напряжение на дуге  $U_{\text{д}} = 20 + \frac{0,05}{\sqrt{d_3}} I_{\text{св}} \pm 1$ , т.е. при сварочной проволоке

диаметром 2 мм и сварочном токе, изменяющемся в пределах 320...400 А, напряжение на дуге будет 30...35 В, а мощность дуги 9,6...14 кВт. Таким образом, для производства работ нужно использовать сварочный источник, имеющий выходную мощность не менее 14 кВт.

Скорость сварки  $v_{\text{св}} = A/I_{\text{св}}$ , для сварочной проволоки диаметром 2 мм коэффициент  $A = (8 \dots 12) \cdot 10^3$  А · м/ч. Таким образом, скорость сварки ориентировочно составит 20...40 м/ч.

### 3.2.7. Влияние режимов сварки на параметры сварного шва

Основные закономерности влияния режимов дуговой сварки на параметры формирующегося сварного шва (рис. 21) суммированы ниже (здесь используется нотация  $\Rightarrow$  означающая «следует», «ведет к»).

#### Ток

1. Ток растет  $\Rightarrow$  повышается давление дуги  $\Rightarrow$  больше вытесняется расплав  $\Rightarrow$  утоньшается слой расплава под дугой  $\Rightarrow$  уменьшаются тепловое сопротивление  $\Rightarrow$  увеличивается глубина шва.

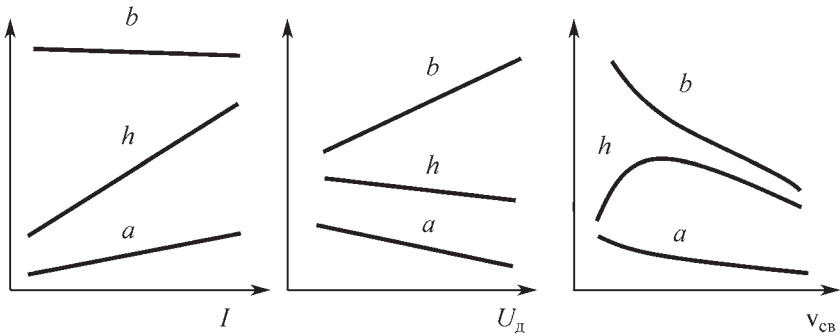


Рис. 21. Влияние сварочного тока  $I$ , напряжения на дуге  $U_d$  и скорости сварки  $v_{св}$  на ширину и высоту шва ( $b$  и  $h$ ) и высоту выпуклости шва ( $a$ )

2. Ток растет  $\Rightarrow$  увеличивается количество расплавленного металла  $\Rightarrow$  увеличивается выпуклость (усиление) шва.

Увеличение тока слабо влияет на ширину шва, а благодаря вышеописанным эффектам, общая высота шва растет значительно, в результате коэффициент формы шва  $K = b/h$  уменьшается. Это затрудняет дегазацию сварочной ванны, формируется неплавный переход от поверхности основного металла к поверхности выпуклости шва, увеличивается опасность возникновения горячих трещин.

#### *Напряжение на дуге*

Напряжение растет  $\Rightarrow$  растет длина дуги (или напряжение растет в результате удлинения дуги)  $\Rightarrow$  увеличивается подвижность (блуждание) дуги  $\Rightarrow$  увеличивается ширина шва. Так как тепловая энергия выделяется на большей площади, то плотность мощности падает, и глубина проплава и высота шва уменьшаются.

Таким образом, видно, что влияние тока и напряжения практически противоположны. Вывод: для сохранения режима сварки при увеличении сварочного тока желательно увеличивать напряжение на дуге.

#### *Скорость сварки*

При увеличении скорости сварки погонная мощность уменьшается, и в результате уменьшаются ширина и глубина шва (на

малых скоростях сварки глубина шва может несколько увеличиваться с ростом скорости из-за большего оттеснения части расплава в хвостовую часть ванны и снижения толщины ванны под дугой).

Если увеличивать скорость сварки при условии поддержания постоянной погонной энергии (увеличивать мощность дуги пропорционально увеличению скорости), то термический к.п.д. и глубина проплавления будут возрастать, а ширина шва уменьшаться. В целом это благоприятные изменения, однако нужно учесть, что одновременно будут расти и температурные градиенты, термические напряжения, а при скорости выше 70...80 м/ч будет увеличиваться риск возникновения подрезов и несплавлений.

#### *Полярность*

При использовании современных сварочных материалов при токах до 450...600 А, как большая скорость плавления электрода, так и большая глубина проплавления основного металла чаще наблюдаются при сварке на обратной полярности (за повышение глубины проплавления здесь ответственен меньший размер катодного пятна по сравнению с анодным, см. раздел 2.2.1). При больших токах ситуация может измениться на противоположную. Разбрызгивание при обратной полярности заметно меньше.

Сварка неплавящимся электродом преимущественно проводится на прямой полярности, так как при сварке на обратной полярности резко увеличивается расход и повреждаемость электродов.

Сварка на переменном токе в этих отношениях занимает промежуточное положение между сварками на прямой и обратной полярностях.

#### *Диаметр электрода*

Увеличение диаметра электрода увеличивает блуждание дуги. В результате ширина шва растет, а высота уменьшается.

#### *Угол наклона электрода*

Изменяя наклон электрода, меняем направление и величину вытеснения расплава под электродом. Таким образом, в небольших пределах можно менять глубину сварочной ванны и регулировать коэффициент формы шва (при сварке «углом назад» проплавление максимальное, при сварке «углом вперед» минимальное).

### *Свойства флюса*

С повышением стабилизирующих свойств флюса растет длина дуги  $\Rightarrow$  увеличивается блуждание дуги, и, как результат, это приводит к увеличению ширины шва.

### **3.2.8. Техника и приемы ручной дуговой сварки**

Техника зажигания: прикосновением или чирканьем («спичкой»). Последний способ при ручной сварке удобнее, но в узких и стесненных местах он может оказаться сложным в применении.

При отсутствии колебаний конца электрода ширина формирующегося шва будет равна  $(0,8...1,5)d_e$ . Обычно этого слишком мало, потому электродом совершают поперечные колебания. С учетом поступательного движения конец электрода перемещают зигзагообразно или волнообразно. При волновом движении электрод дольше находится у краев шва, что способствует лучшему прогреву кромок и лучшему сплавлению. С этой же целью можно перемещать конец электрода и по спирали.

При зигзагообразном движении возрастает относительное время пребывания электрода на оси, и это несколько улучшит проплавление центра шва.

Если же проход выполняется без поперечной осцилляции электродом, то говорят, что сварку ведут *в нитку* (таким способом часто выполняют корневые проходы).

При сварке в нижнем положении электрод обычно держат «углом назад», т.е. наклоненным в сторону сварки на  $10...15^\circ$ , это несколько улучшает проплавление (потому при сварке тонких изделий для уменьшения опасности прожога, напротив, применяют наклон «углом вперед»).

В большинстве случаев следует избегать наклона электрода в бок (в сторону кромок), так как это может вызвать появление подреза. Только при выполнении горизонтальных швов электрод специально наклоняют вниз — так, чтобы давление дуги поддерживало расплав.

Вертикальные швы чаще ведут снизу вверх, чтобы уже закристаллизовавшаяся их часть служила поддержкой сварочной ванны, при этом электрод наклоняют так, чтоб силой давления дуги препятствовать стеканию расплава.

При горизонтальной, вертикальной и потолочной сварке для уменьшения объема сварочной ванны уменьшают ток и диаметр электрода, для уменьшения длины дуги снижают напряжение, кроме того, в потолочном положении сварку чаще всего ведут в нитку.

По длине швы делят на короткие (длинной до 250...300 мм), средние (до 1 м) и длинные (более 1 м). Короткие швы сваривают напроход (от одного края изделия к другому), средние — от середины к краям (лучше, если при этом работают два сварщика).

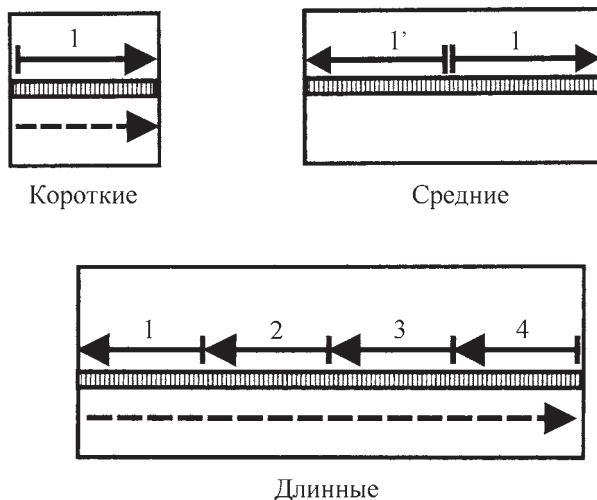
Длинные швы, как правило, выполняют так называемым обратнo ступенчатым способом. В этом случае шов разбивают на участки по 150...200 мм. Направление сварки на каждом из этих участков и порядок чередования свариваемых участков противоположны. Для длинных швов могут применяться и еще более сложные схемы сварки (рис. 22). Использование подобной техники сварки уменьшает сварочные деформации (коробление).

По числу слоев в каждом сечении швы делят на однопроходные, многослойные (по одному проходу в каждом из слоев) и многопроходные (несколько проходов в каждом из слоев). Число слоев и проходов зависит от соотношения толщины изделия и диаметра электрода. Однопроходная сварка самая производительная, но при сварке средних толщин ее качество не такое высокое, как при многопроходной, а сварку больших толщин (свыше 15 мм) выполнить за один проход практически невозможно.

В конце шва нежелательно обрывать дугу сразу, так как это ведет к образованию кратера. Чтобы его не было, дугу смещают на край сварочной ванны и уже из этого положения быстро отводят. Если кратер все же появился, то его нужно заварить. Автоматическую сварку часто начинают и заканчивают не на самих деталях, а на выводных пластинах, которые потом отрезают.

Еще одна проблема при автоматической сварке, вызванная повышенными плотностями тока, — возможность прожога и вытекания ванны. Последнего можно избежать несколькими способами: 1) предварительной ручной сваркой корневого прохода; 2) сваркой на остающейся стальной подкладке; 3) сваркой на удаляемой технологической подкладке (при сварке стали применяются медные подкладки, при сварке меди — графитовые); 4) сваркой на флюсовой подушке; 5) специальной подготовкой кромок для сварки без зазора.

Первый способ требует применения высококвалифицированного труда и снижает производительность. Второй приводит к тому,



**Рис. 22. Схемы сварки коротких, средних и длинных швов:**

---> — общее направление сварки, —> — направление сварки отдельных участков (цифры — порядок сварки этих участков)

что в конструкции остается «лишняя» технологическая деталь, могущая осложнить последующую эксплуатацию изделия (так, подкладные кольца в трубопроводах мешают внутритрубной диагностике и очистке трубопроводов).

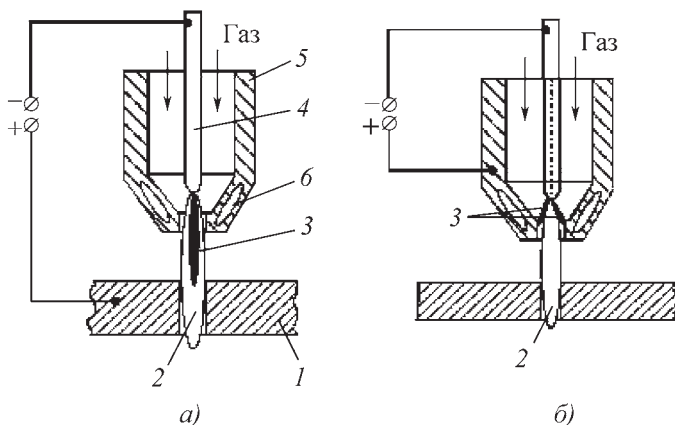
Наиболее технологичны третий, четвертый и пятый способы. При сварке стали применяются медные прокладки, при сварке меди — графитовые.

### 3.3. ДРУГИЕ СОВРЕМЕННЫЕ ВИДЫ СВАРКИ

#### 3.3.1. Плазменная сварка и резка

Для плазменной сварки и резки применяются устройства, называемые плазматронами. В них создается сжатая дуга, описанная ранее. Схема плазматрона приведена на рис. 23.

Анод обыкновенно представляет собой водоохлаждаемый медный колпачок. Центральный катод изготавливается из тугоплавкого металла (вольфрама, иногда гафния), часто это медный стержень с тугоплавкими вставками.



**Рис. 23. Принципиальная схема плазматрона:**

*а* — прямого и *б* — косвенного действия; 1 — деталь; 2 — плазменная струя; 3 — дуга; 4 — катод; 5 — корпус-анод; 6 — водоохлаждаемые каналы

Подаваемый газ служит не только для создания плазменного факела, также он охлаждает центральный катод, окружает плазменную струю и отделяет ее от стенок анода, защищая таким образом последний. Чаще всего в плазматроне используется один рабочий газ. Но иногда применяют два, разделяя их функции на плазмообразующие и защитные. В последнем случае плазмообразующий газ подается к катоду, а защитный — в зону факела (столба плазмы).

Если дуга горит внутри головки плазматрона, то такой плазматрон называется плазматроном косвенного действия; если между катодом и изделием — то прямого (для создания прямой дуги первоначально все равно зажигается внутренняя, называемая дежурной, затем она выдувается и после переключения напряжения с сопла-анода на деталь дуга начинает гореть между катодом и деталью). Качество сварки и резки выше у плазматронов косвенного действия, а производительность у плазматронов прямого действия.

По концентрации энергии в зоне обработки плазматроны уступают только лазерам и электронно-лучевым пушкам, сильно выигрывая перед ними по стоимости. Кроме того, плазматроны более компактны.

Одним из наиболее часто используемых в плазматронах газов является аргон. Однако его эффективность не слишком велика из-за невысокого потенциала ионизации, в результате чего напряженность электрического поля в аргоне не может быть большой (наступает пробой), и, следовательно, выделение тепла на единицу дуги также невысокое. Кроме того, из-за относительно малой теплопроводности и энтальпии перенос тепла также осуществляется не очень эффективно.

Эффективность гелия выше в несколько раз, но он дороже, а стойкость сопла при его использовании понижается, поэтому часто применяют смесь аргона и гелия.

Довольно эффективны азот и водород. Однако они также приводят к быстрому выходу из строя вольфрамового катода и, кроме того, попадая в расплав, могут значительно ухудшить свойства обрабатываемого материала. Поэтому их используют редко (так же, как и воздух, содержащий 78 % азота).

Относительно недавно разработаны так называемые «жидкостные плазматроны», в которых дуга испаряет жидкость, и плазменный столб формируется в потоке пара этой жидкости. Такая схема резко удешевляет и упрощает использование плазматронов, поскольку становятся ненужными газовые баллоны и компрессоры. Однако в подобной плазме присутствует значительное количество водорода, что резко снижает качество сварки. Наиболее распространенные жидкости, используемые в таких плазматронах, это дистиллированная вода (при резке) и спиртовой раствор этилового спирта (при сварке). Можно применять и ацетон, но пары последнего очень вредны.

В последние годы особенно быстро расширяется область применения плазматронов для резки. Для сварки они используются реже. Плазменную сварку рационально вести без разделки кромок, без монтажного зазора и присадочного материала. Фактически сварка идет в режиме «заплавляемой резки».

### 3.3.2. Газовая сварка и резка

При газовой сварке и резке нагрев происходит в пламени какого-либо горючего газа. Для сварки это чаще всего ацетилен ( $C_2H_2$ ) с температурой горения  $3200\text{ }^\circ\text{C}$  или синтетический газ МАФ (метилацетилен-алленовая фракция), имеющий температуру горения  $2900\text{ }^\circ\text{C}$ .

Температура горения пропан-бутановой смеси около 2100 °С, что недостаточно для сварки, но вполне хватает для резки. Потому пропан-бутановая смесь, как более дешевая, для газовой резки обычно и применяется.

Первым для сварки применил ацетилен Анри Луи Ле Шателье в 1895 г. Ацетилен легко плавил металл, но при горении образовывал толстый слой нагара, забивавший любую горелку. В 1899 г. французским инженером Эдмоном Фуше была изобретена горелка, в которой ацетилен смешивался с кислородом и горел без копоти. Позднее Фуше иммигрировал в Германию, где газовая сварка в последующие годы быстрее всего и развивалась.

В принципе, как для резки, так и для сварки, но только малых толщин, можно применять пары керосина, температура горения которых 2500 °С. В настоящее время, однако, такую технику используют редко. В качестве окислителя со всеми перечисленными выше горючими газами применяется кислород.

Присадочный материал при газовой сварке — сварочная проволока, оптимальный диаметр которой  $d = s/2 + 1$ , где  $s$  — толщина свариваемого металла.

При газовой резке металл нагревают до температуры начала его горения в кислороде (для стали — 800 °С). Далее температура возрастает уже за счет экзотермической реакции горения железа в кислороде (именно поэтому при газовой резке не требуется применения горючих газов с высокой температурой горения).

Получающийся расплав частично сгорает, но большая его часть выдувается струей газов. При повышении температуры начала горения и понижении температуры плавления процесс резки осложняется, и в случае, если плавление происходит при температурах более низких, чем начало горения, резка крайне затрудняется. Именно этим объясняется плохая резка чугуна.

С понижением чистоты кислорода значительно снижается производительность резки и повышается расход кислорода. Потому для резки необходимо использовать кислород чистотой не менее 98,5 %.

При резке металла средних толщин расход кислорода составляет: при машинной резке 0,75...0,9 л, при ручной 1,1...1,3 л на каждый квадратный сантиметр поперечной площади реза.

Ацетилен очень опасный и не удобный в обращении газ, поскольку взрывоопасен и чрезвычайно взрывоопасен в сжиженном состоянии. Однако его используют из-за высокой температуры горения. В ряде случаев возможна его замена на МАФ, но этот газ плохо известен практическим работникам и для него выпускается мало специальной сварочной аппаратуры.

В большинстве случаев горючие газы и кислород доставляются к месту сварки в специальных металлических баллонах. Кислородные баллоны окрашивают в синий цвет, баллоны, содержащие любые горючие газы, кроме ацетилена, — в красный, баллоны для ацетилена — в белый. Кроме соответствующей окраски, баллоны должны иметь и соответствующую надпись. В верхней части баллона выбивают его паспортные данные.

Рабочее давление баллонов зависит от газа. Так, давление в кислородных баллонах при нормальных условиях 150 атм, в пропан-бутановых 16 атм (давление сжижения газа), ацетиленовых 20 атм.

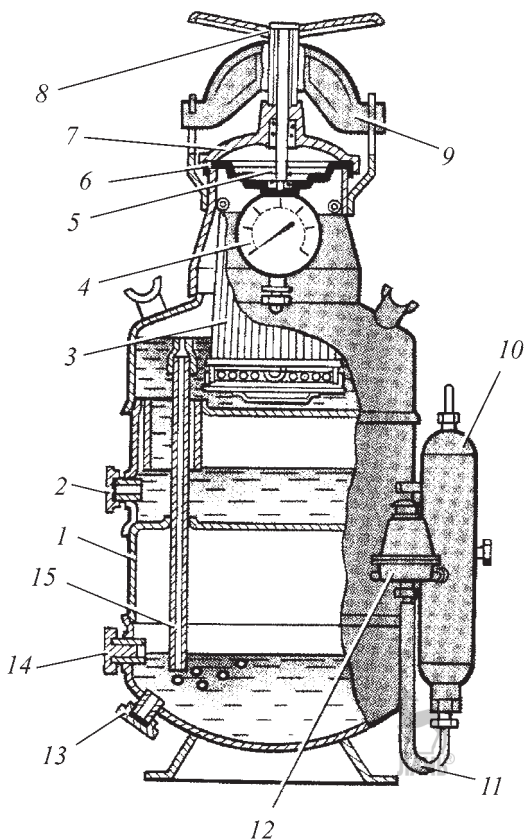
В отличие от всех других баллонов ацетиленовый заполнен пористой массой, пропитанной ацетоном. И уже в ацетоне растворяется ацетилен (ацетон вредное и пожароопасное вещество, но все же не столь опасное, как ацетилен).

Таким образом, разные газы в баллонах находятся в разных агрегатных состояниях: кислород, азот и гелий — в сжатом, пропан-бутановая смесь и  $\text{CO}_2$  — в сжиженном, ацетилен — в растворенном.

При сварке на удаленных объектах, в строительстве ацетилен часто получают в специальных ацетиленовых генераторах при разложении карбида кальция водой (рис. 24). В конструкции генератора обязателен водяной затвор для исключения обратных ударов, могущих привести к взрыву. Необходимо следить, чтобы этот затвор всегда был заполнен водой.

На штуцеры баллонов навертывают редукторы, которые снижают давление газа до рабочего и поддерживают давление постоянным. Редукторы рассчитаны на какой-либо определенный газ и они не взаимозаменяемы. Корпус редуктора окрашивается так же, как и соответствующий баллон, а на шкале манометров написано для какого газа он предназначен.

От манометра к горелке газы поступают по резиноканевым рукавам (шлангам). Эти рукава должны иметь отличительный цвет



**Рис. 24. Ацетиленовый генератор:**

1 — корпус; 2, 13 — штуцеры; 3 — корзина; 4 — манометр; 5 — пружина; 6 — мембрана; 7 — крышка; 8 — винт; 9 — траверса; 10 — предохранительный затвор; 11 — шланг; 12 — предохранительные клапаны; 14 — контрольная коробка; 15 — переливная трубка

или на них должна быть нанесена того же цвета отличительная полоса. Цвета рукавов: синий — кислород; красный — горючий газ; желтый — горючая жидкость. Рукава надевают на штуцеры редукторов и горелок и закрепляют на них хомутами. Допускается крепить проволоочной закруткой, но таких закруток должно быть как

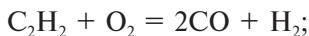
минимум две на каждый штуцер. Длина рукавов должна быть достаточной, чтобы разместить баллоны не ближе 10 м от места сварочных работ. Не рекомендуется длина рукавов более 30 м и не допускается более 50 м.

Горелки бывают инжекторного типа и безинжекторные. В первых центральная сильная струя кислорода, истекающая с большой скоростью из сопла, называемого инжектором, подсасывает струю горючего газа, истекающего с меньшим давлением, смешивается с ним, и на выходе из мундштука они сгорают (рис. 25). В безинжекторных горелках горючий газ и кислород поступают под одинаковым давлением в камеру смешения.

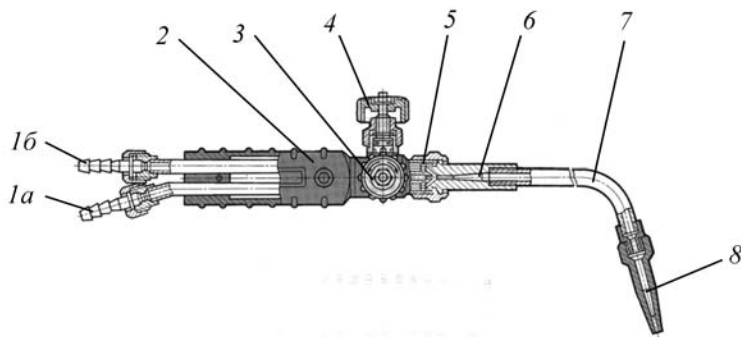
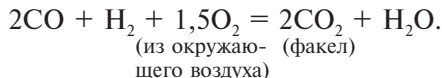
Горелки различаются по номерам: больше номер — бóльшая пропускная способность и, следовательно, бóльшая мощность. В пределах одного номера мощность пламени регулируется вентилями горелки.

Структура ацетиленового пламени представлена на рис. 26, основные химические реакции:

в ядре:

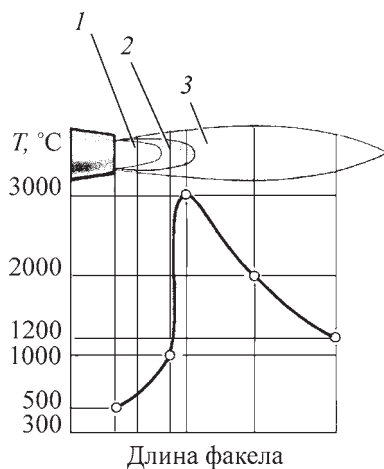


в восстановительной зоне:



**Рис. 25. Инжекторная газовая горелка:**

1 — ниппели для присоединения резиноканевых рукавов и подачи горючего газа (1а) и кислорода (1б); 2 — рукоятка; 3 — вентиль горючего газа (красный шильдик); 4 — вентиль кислорода (синий шильдик); 5 — инжектор; 6 — смешительная камера; 7 — сменный наконечник; 8 — мундштук



**Рис. 26. Структура ацетиленового пламени:**

1 — ядро — продукты распада ацетилена, сгорающие в оболочке ядра; 2 — восстановительная зона — оксид углерода и водорода, раскисляющие сварочную ванну; 3 — факел — область полного сгорания

Пламя может быть *нормальным* (отношение ацетилена и кислорода от 1:1 до 1:1,3), *окислительным* (избыток кислорода), *науглероживающим* (избыток горючего газа). Внешние признаки: при переходе от нормального пламени к окислительному появляется шум, пламя укорачивается; науглероживающее, напротив, более длинное, с зеленоватым оттенком; все зоны лучше очерчены у нормального пламени.

Сварку ведут при нормальном пламени, резку — при избытке кислорода, науглероживающее пламя может быть применено для местной цементации. Максимальная температура ацетиленового пламени в восстановительной зоне наблюдается в 2...4 мм от границы с ядром. Этой областью и надо работать. Температура окислительного пламени больше, но качественную сварку выполнить им нельзя. Область с максимальной температурой пропан-бутанового пламени находится на расстоянии 2,5 длины ядра от среза мундштука.

Продукты горения создают некоторую защиту сварочной ванны, и потому газовую сварку ведут без использования флюсов. Од-

нако из-за подсоса кислорода степень этой защиты не слишком велика. Для ее повышения к горючим газам могут подмешиваться вещества, служащие «газовым флюсом». Так, в этих целях применяют вводимый в пламя раствор ортометилбората.

### 3.3.3. Электроконтактная сварка

Сущность электроконтактной сварки проста — две детали сжимают, через них пропускают сильный электрический ток, и нагрев зоны сварки осуществляется за счет джоулева тепла. При этом большая часть этой теплоты выделяется в месте наибольшего сопротивления, т.е. в месте контакта деталей, и в результате оно сильно нагревается (обычно не до плавления). Затем детали сжимают сильнее, нагретая пластическая зона деформируется, происходит сварка (метод был предложен американским физиком Элиху Томсоном в 1886 г.)

Существуют две основные разновидности электроконтактной сварки: стыковая и точечная. В первом случае две детали сжимают торцами. Во втором, наиболее распространенном, два листа зажимают между двумя медными электродами (рис. 27). Иногда для улучшения электрического контакта на поверхности деталей делают специальные выштамповки. Такую сварку называют рельефной.

Ориентировочно давления при стыковой сварке низкоуглеродистых сталей составляют 50...100 МПа, легированных — 100...150 МПа. Скорость осадки — 20...200 мм/с. Усилие сжатия при точечной сварке низкоуглеродистых сталей выбирается  $(100...200)s$ , где  $s$  — толщина листа. Плотность тока —

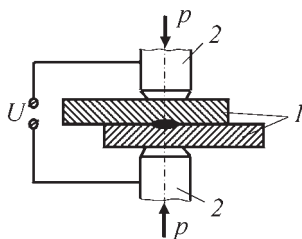


Рис. 27. Схема точечной электроконтактной сварки:

1 — свариваемые листы; 2 — медные электроды

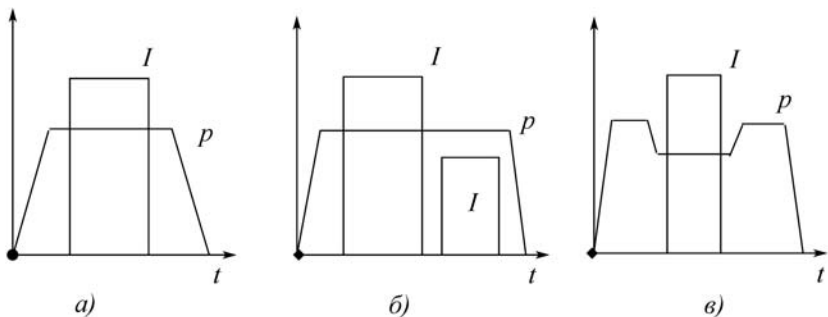
100...400 А/мм<sup>2</sup>. Диаметр электродов  $2s + 2,5$  мм. КПД сварки возрастает на порядок при импульсном нагреве.

Несколько сварных точек в линию образуют точечный шов. Электроды могут быть заменены на ролики. Если деталь перемещается, а ролики вращаются в момент сварки, то можно получить и сплошной шов. Однако его качество ниже, а ролики перегреваются и быстро выходят из строя. Если процесс сварки и смещение деталей разделить во времени, то мы получим пунктирный шов. Последний будет более качественным, чем сплошной.

Несколько типичных совмещенных диаграмм сварки приведено на рис. 28. Усилие на электроды должно прикладываться как минимум за  $0,5...3$  с до подачи тока, а сниматься не ранее, чем через  $2..6$  с после выключения тока (раннее снятие нагрузки особенно вредит качеству сварки).

Достоинства электроконтактной сварки — высокие производительность и качество сварки, безопасность, отсутствие вредных излучений. Недостаток — ограниченность номенклатуры свариваемых деталей по геометрии (для стыковой сварки это, прежде всего, детали вращения — валы, стержни, трубы, для точечной — листы). Типичный пример точечной электроконтактной сварки — сварка корпусов автомобилей.

Деталь, находящаяся в пределах магнитного контура машины, шунтирует этот контур, что снижает сварочный ток. Также ток,



**Рис. 28. Совмещенные диаграммы сварочного тока ( $I$ ) и давления ( $P$ ) от времени ( $t$ ) при электроконтактной сварке:**

$a$  — обычная;  $б$  — с отпуском;  $в$  — с предварительным обжатием и последующей проковкой

проходящий через свариваемую точку, уменьшается за счет шунтирования его ранее сваренными точками. Эти явления необходимо учитывать при сварке.

Качество электроконтактной сварки в значительной мере зависит от степени очистки свариваемых поверхностей. После грубой предварительной очистки, непосредственно перед сваркой детали очищают снова. В массовом производстве чаще травлением, а в мелкосерийном или ремонтном производстве — зачисткой щетками или наждачной бумагой.

Еще один источник брака при сварке — плохой прижим, когда в месте контакта остается воздух. При нагреве воздух расширяется и может выплеснуть расплав, что приведет к формированию дефектной сварной точки. Дефектная сварная точка с полостью имеет куполообразный внешний вид (см. рис. 12, а).

Электроконтактная сварочная установка в моменты собственно сварки потребляет из сети значительную мощность. Но между этими весьма кратковременными моментами ток из сети практически не потребляется. Такой режим очень нерационален с точки зрения использования сетевых мощностей.

Следовательно, резонно возникает вопрос о возможности запастись энергией между циклами, что снизит мгновенную мощность, потребляемую из сети. По такому принципу работает *конденсаторная сварка*, при которой собственно сварка происходит при разрядке батареи конденсаторов, заряжающихся в промежутке между импульсами. Дополнительными преимуществами конденсаторной сварки является возможность более точно регулировать энергию сварки и более короткий сварочный импульс, что приводит к меньшим ЗТВ и сварочным деформациям.

Недостаток конденсаторной сварки — малая мощность и отсюда возможность сваривать только малые толщины. Потому она применяется в основном в приборостроении.

#### 3.3.4. Прессовая (холодная) сварка

Два листа сильно сжимаются двумя пуансонами (в отличие от электроконтактной сварки, через пуансоны не пропускают ток, и пуансоны не медные, а изготовленные из закаленной высокопрочной стали).

Сварка осуществляется за счет сильной местной пластической деформации (максимальная прочность достигается при продавливании пуансоном порядка 60 % от толщины листа). Давление в зависимости от материала изделия составляет 0,5...2,5 ГПа.

Подобной сварке подвергаются только пластичные материалы, и она требует высокой степени очистки поверхностей свариваемых деталей (даже следы от пальцев могут привести к браку).

### 3.3.5. Диффузионная сварка в вакууме

Как и при механической холодной сварке, детали сжимают, но в вакууме и без значительной деформации. Сварка происходит за счет взаимной диффузии материалов изделий. Сварка может производиться как без нагрева, так и для ускорения диффузии с нагревом.

Сила прижатия при этом виде сварки составляет от 1 МПа (при сварке алюминия) до порядка 10 МПа (при сварке стали 45). Время выдержки обычно 5...30 мин, но иногда может достигать и суток.

Достоинство этого вида сварки — сварить можно практически все и в любых сочетаниях. Недостаток — дороговизна и низкая производительность (из-за необходимости вакуумировать изделие, долго выдерживать детали под нагрузкой в вакууме, а также высоких требований к качеству очистки поверхностей перед сваркой).

### 3.3.6. Сварка трением

Принцип: сжимают две детали, вращающиеся одна относительно другой. В результате трения их контактные поверхности нагреваются до нужной температуры, затем детали останавливают и после остывания образуется сварное соединение. Оптимальная температура нагрева при сварке стали составляет 500...1350 °С.

На практике оказывается более удобным применять несколько иную кинематику. Деталь зажимается в шпинделе, имеющем маховик. Последний приводится во вращение. Другая деталь зажимается в пассивном заторможенном шпинделе. По истечении определенного времени и достижения нужной температуры тормоз пассивного шпинделя отпускается, а двигатель активного выключается.

чается. Скорости вращения шпинделей быстро сравниваются, так как момент инерции пассивного шпинделя мал, и вся система плавно останавливается.

Подобная схема не требует резкого торможения, нет повышенных нагрузок на сваренные детали и нет необходимости в мощном приводе. Практический пример такой сварки — приварка карданной вилки к трубе карданного вала автомобиля КАМАЗ. В ремонтных целях можно проводить сварку трением и на обыкновенном токарном станке, хотя это и требует высокой квалификации токаря.

Достоинства сварки трением: высокая производительность и качество сварки, экономичность (расход энергии на порядок ниже по сравнению с контактной сваркой и на два порядка по сравнению с дуговой); сварка позволяет сваривать разнородные материалы (например, приварка быстрорежущей рабочей части к хвостовику из конструкционной стали при изготовлении сверл и разверток).

Недостаток — ограниченность номенклатуры деталей по геометрии.

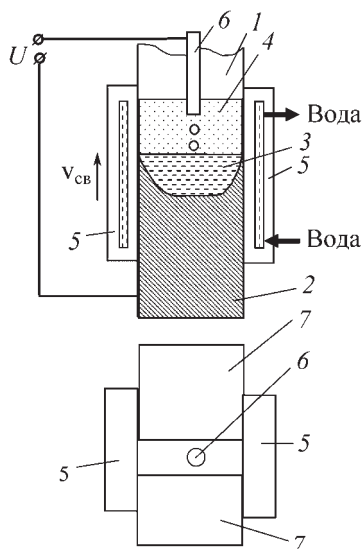
### 3.3.7. Электрошлаковая сварка

В 50-х годах прошлого века в СССР была разработана так называемая электрошлаковая сварка (рис. 29).

Сварка начинается в области специально приваренного кармана и оканчивается на выводных пластинах (их потом отрезают). После зажигания дуги начинается плавление присадочного материала и флюса, создающих сварочную ванну. Когда слой шлака поглощает конец электрода, флюс шунтирует дугу, и она гаснет, теплота теперь выделяется при прохождении тока через расплав шлака.

По мере расплавления электродов уровень сварочной ванны повышается, на дне ее происходит кристаллизация и сварочная ванна перемещается вверх. Синхронно с ней вверх перемещаются и поддерживающие ее с боков медные водоохлаждаемые ползуны. Капли расплавленного материала электродов попадают в сварочную ванну, проходя через слой расплавленного флюса, очищаясь при этом.

Электрошлаковая сварка позволяет производить сварку деталей толщиной от 20 до (рекордно) 3500 мм! (Обычно до метра.) При этом до толщин в 450 мм сварку ведут проволочными электродами, выше —



**Рис. 29. Схема электрошлаковой сварки:**

1 — зазор между листами; 2 — закристаллизовавшийся шов; 3 — сварочная ванна; 4 — шлаковая ванна; 5 — медные водоохлаждаемые ползуны; 6 — электрод (электроды); 7 — свариваемые детали

ленточным, многопроволочными (до 16 из расчета одна проволока на каждые 150 мм толщины) или даже штучными массивными.

Линейная скорость электрошлаковой сварки достаточно мала, может достигать 10 м/ч, но чаще всего 0,4...1 м/ч. Однако поскольку за один проход сваривается вся толщина металла, результирующая производительность оказывается достаточно высокой.

Швы простые, линейные или круговые (при вращении изделий). Их расположение только вертикальное ( $\pm 20^\circ$  от вертикали).

Металлургическое качество металла шва весьма высокое за счет очистки расплава шлаком. Однако из-за сильного перегрева при сварке растет зерно, поэтому желательна послесварочная термообработка.

Сварочная установка состоит из станда и сварочного агрегата (включающего источник питания, автоматику, подводящие кабели и пр.). Так как приостановка сварки приводит к неисправимому бра-

ку, а соединяемые этим видом сварки детали обычно весьма дорогие или даже уникальные, то все узлы сварочного агрегата обычно сдублированы.

### 3.3.8. Лучевые методы сварки и резки

Лучевые методы сварки и резки (или сварки и резки КПЭ) объединяют электронно-лучевую, лазерную и светолучевую.

Электронно-лучевая установка включает в себя электронно-лучевую пушку, вакуумную камеру, технологическую оснастку и системы контроля и управления.

Электронно-лучевая пушка, по существу, такая же, как и в электронно-лучевых трубках телевизоров и осциллографов, только на несколько порядков более мощная.

Вакуумная камера необходима в связи с тем, что электронный луч очень сильно тормозится в воздухе, практически полностью теряя свою мощность на нескольких сантиметрах. Для первоначальной откачки воздуха из камеры (создания форвакуума) применяют механические центробежные насосы. Далее воздух откачивается (создается высокий вакуум) чаще всего пароструйными насосами. Необходимость использования вакуумной техники сильно осложняет и удорожает процесс электронно-лучевой сварки и резки.

Для лазерной резки и сварки в основном применяют газовые  $\text{CO}_2$ -лазеры, твердотельные лазеры на алюмоиттриевом гранате и неодимовом стекле.

КПД лазеров в несколько раз меньше, чем у электронно-лучевых пушек, при том, что и коэффициент поглощения излучения (эффективный КПД) также меньше. Однако лазерную сварку и резку можно вести на воздухе или в защитных газах, что является значительным преимуществом — отсутствие вакуума значительно упрощает и облегчает эксплуатацию установок.

Процессы при лазерной и электронно-лучевой сварке и резке весьма близки, сходные значения имеют и качественные показатели. В целом можно утверждать, что в настоящее время в большинстве случаев эти технологии обеспечивают наивысшее качество сварки и термической резки.

**Светолучевая сварка** осуществляется фокусированием светового потока от мощных ксеноновых ламп, по существу таких же, какие используются при оптической накачке в твердотельных лазерах. Исключение дополнительного превращения энергии (в активном элементе лазера) приводит к значительному повышению КПД светолучевых установок по сравнению с лазерными. Однако из-за того, что излучение некогерентно, его не удается фокусировать в столь малое пятно, как у лазера. Это снижает плотность энергии в пятне нагрева, понижает эффективный и термический КПД процесса. Как правило, в светолучевых установках не удается получить температуру в фокусе выше  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , и потому такие установки используются в основном для пайки.

### 3.3.9. Ультразвуковая сварка

Схема сварки приведена на рис. 30. Инструмент прижимается к свариваемым деталям, и в нем возбуждаются ультразвуковые колебания в плоскости, параллельной разделу (обычно с амплитудой  $20\text{...}40\text{ мкм}$ ). При трении поверхностей с последних будут соскабливаться загрязнения, выступы, шероховатости, за счет трения будет расти контактная температура, и, наконец, произойдет схватывание. Таким образом, фактически ультразвуковая сварка — это разновидность сварки трением.

Скорость сварки до  $150\text{ м/ч}$ . Максимально возможные толщины свариваемых деталей до  $1\text{ мм}$  для цветных металлов и нескольких миллиметров для пластмасс.

Преимущества: сварка характеризуется высокой производительностью и прочностью швов, не требует тщательной подготовки

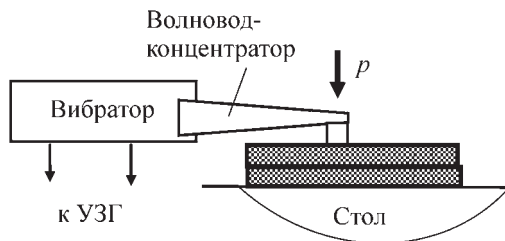


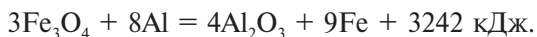
Рис. 30. Схема ультразвуковой сварки

поверхностей перед сваркой (все загрязнения при сварке соскабливаются), практически отсутствует ЗТВ.

Недостаток сварки — ограниченность свариваемых деталей по толщине и типам материалов.

### 3.3.10. Термитная сварка

Химическая реакция взаимодействия оксидов железа с алюминием (алюмотермическая реакция) протекает с большим выделением теплоты по следующему уравнению:



Смесь железной окалины и алюминиевого порошка в технике получила название *термит*. Получающуюся при сгорании таких смесей высокую температуру можно использовать для сварки, и такую сварку называют термитной.

Обычно сначала происходит поджиг и сгорание термита, а уже затем разделка заполняется расплавленным металлом, получившимся в результате сгорания термита. Разогрев и плавление кромок свариваемых деталей осуществляются за счет теплосодержания жидкого присадочного металла, поэтому объем последнего выбирают в 2–3 раза большим, чем это необходимо для заполнения разделки.

При сварке же внахлест термитный брикет помещают на поверхность верхней детали, горящий термит проплавляет насквозь верхнюю, частично нижнюю деталь, и образуется общая сварочная ванна, а после затвердевания — сварное соединение. При этом важно так подобрать навеску термита, чтобы он не прожег насквозь обе детали.

Главным преимуществом термитной сварки является возможность ее осуществления практически без всякого технологического оборудования и, следовательно, доступность для работ в полевых условиях. Так, в трубопроводном транспорте термитной сваркой часто приваривают шины катодной защиты.

## Глава 4

### КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРКИ

---

---

#### 4.1. ОСНОВНЫЕ СВАРОЧНЫЕ ДЕФЕКТЫ

Главная причина появления дефектов при сварке — нарушение технологии. Основные сварочные дефекты показаны на рис. 31 и рис. 12. Непосредственные причины их образования суммированы в табл. 4.

#### 4. Дефекты сварных швов

| Наименование    | Причина появления   |
|-----------------|---|
| Прожоги и свищи | Чрезмерно высокая погонная энергия сварки<br>Большой зазор между кромками свариваемых деталей<br>Плохое поджатие флюсовой подушки или подкладки (если они необходимы по технологии)   |
| Кратеры         | Резкий обрыв дуги в процессе или при завершении сварки  |
| Подрезы         | Недостаточное количество присадочного материала (недостаточная скорость плавления электрода)<br>Недостаточное число слоев или проходов в шве<br>Смещение или наклон электрода в сторону (противоположной подрезу)<br>Отступления от технологии при сварке горизонтальных швов<br>Высокие значения силы тока |
| Непровар        | Отсутствие разделки или слишком малый угол разделки<br>Недостаточный сварочный зазор<br>Слишком малая погонная энергия сварки   |
| Несплавление    | Грязь или влага на кромках (плохая зачистка и просушка)<br>Слишком малая погонная энергия сварки<br>Слишком низкая температура свариваемых кромок (отсутствие подогрева при сварке)   |

Окончание табл. 4

| Наименование                               | Причина появления   |
|--|---|
| Неравномерная форма шва                    | <p>Неустойчивый режим сварки (неподходящая вольт-амперная характеристика источника для данных режимов)</p> <p>Неправильное манипулирование электродом</p>   |
| Наплывы                                    | <p>Излишнее количество присадочного материала (излишняя скорость плавления электрода)</p> <p>Смещение или наклон электрода в сторону (ту, где наплыв)</p> <p>Излишне длинная дуга</p>   |
| Поры                                       | <p>Слишком быстрое затвердевание сварочной ванны</p> <p>Слишком малый коэффициент формы шва</p> <p>Влажные или загрязненные кромки</p> <p>Низкое качество или отсутствие прокалки сварочных материалов</p>  |
| Включения шлака, неметаллические включения | <p>Плохая очистка шва от шлака перед выполнением следующего прохода</p> <p>Слишком низкая погонная энергия сварки</p> <p>Грязь на кромках</p>   |
| Перегрев или пережог                       | <p>Слишком высокая погонная энергия сварки</p>  |
| Подкалка шва или ЗТВ                       | <p>Сварка стали со слишком высоким эквивалентным содержанием углерода</p> <p>Слишком высокая скорость охлаждения</p> <p>Сварка на морозе, ветре или без сопутствующего подогрева</p> <p>Отсутствие необходимой послесварочной термообработки</p>  |
| Трещины                                    | <p>Образование закалочных структур (см. пункт выше)</p> <p>Сварка сталей, имеющих повышенное содержание вредных примесей</p> <p>Высокие напряжения, действующие в процессе сварки (напряжение шва в процессе сварки, сварка заневоленных конструкций и т.п.)</p> <p>Сварка сталей с неблагоприятной структурой или фазовым составом (крупное зерно, в закаленном состоянии и т.п.)</p> <p>Наличие трещин и микротрещин в свариваемых деталях</p> <p>Наличие водорода в металле шва (сварка непрокаленными электродами или по непросушенным кромкам)</p> |

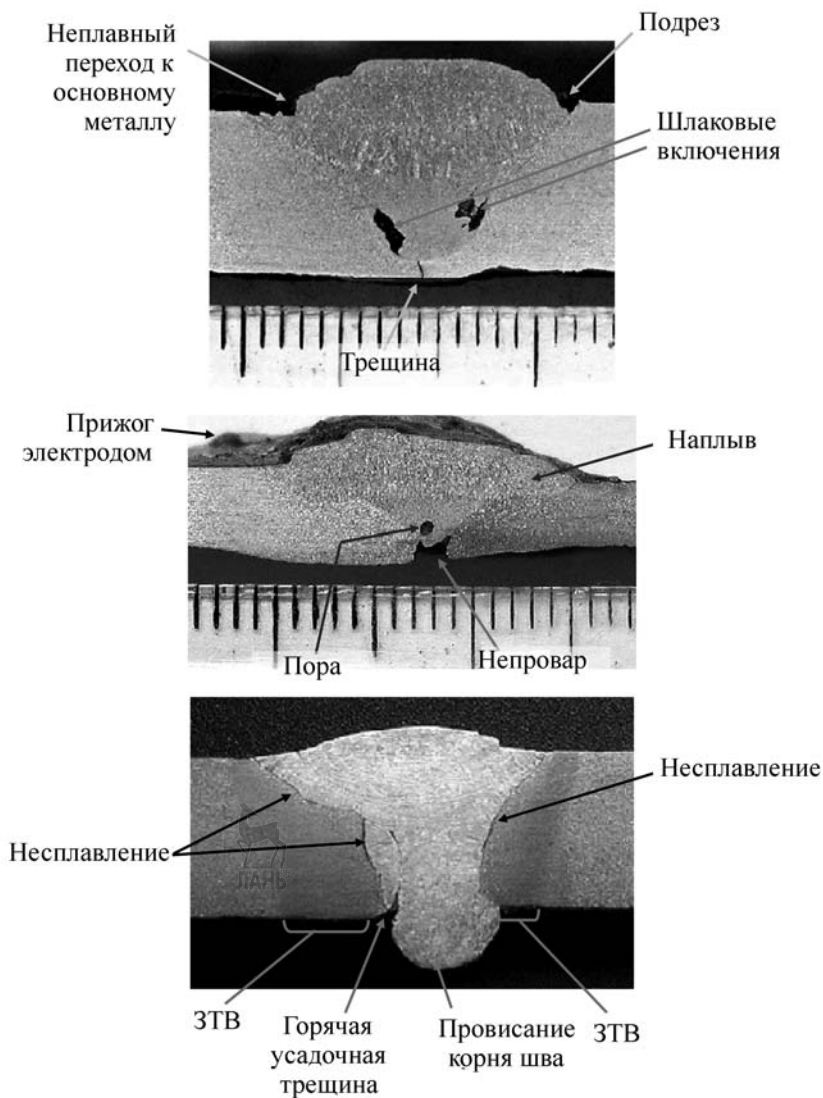


Рис. 31. Дефекты сварных швов, выявленные с помощью металлографии на поперечных шлифах.  $\times 4$

Наиболее опасными дефектами следует признать плоскостные дефекты — несплавления и трещины. Подобные дефекты занимают значительную долю поперечного сечения сварного соединения и потому сильно его ослабляют (рис. 32).



**Рис. 32.** Разрушение кольцевого сварного шва, возникшее через несколько лет после начала эксплуатации — трещина развилась из несплавления, допущенного при сварке

Вершины трещин обычно острые и коэффициент концентрации напряжений в них высокий. Это приводит к тому, что под действием напряжений трещины могут быстро распространяться, что делает их еще опаснее. Особенно опасными с этой точки зрения оказываются холодные трещины.

Кроме сварочных дефектов, сварное соединение может быть забраковано по несоответствию размеров шва указанным в технической документации, превышению монтажных допусков и чрезмерному короблению деталей.

## 4.2. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРКИ

После выполнения сварки прежде всего необходимо удостовериться в отсутствии в шве видимых дефектов и в соответствии геометрических параметров шва заданным. Для этого проводят так называемый визуально-инструментальный контроль (ВИК).

Не видимые с поверхности дефекты выявляют с помощью методов неразрушающего контроля (НК). Существует довольно много

методов НК — ультразвуковой, магнитопорошковый, радиографический (просвечивание рентгеновским или гамма-излучением) и т.п. Однако позволяя находить сварочные дефекты макроразмеров, эти методы оказываются недостаточно чувствительными к микродефектам, а также к изменениям структуры и, соответственно, изменениям в механических свойствах материалов.

Поэтому наиболее надежным методом контроля остается вырезание образцов из различных участков шва, прямое их изучение, в том числе с помощью микроскопа, и измерение механических характеристик. Однако данный способ трудоемок и является деструктивным, разрушающим, и потому может быть только выборочным.

При определении механических свойств сварных соединений применяют по существу те же методы, что и при измерении механических свойств материалов. В первую очередь **это растяжение на разрывной машине** вырезанного из сварного шва образца (чаще всего определяют такие параметры, как предел прочности  $\sigma_{пр}$ , предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , относительное удлинение после разрыва  $\delta$ , относительное сужение после разрыва  $\psi$ ).

**Динамические испытания на изгиб** или, что то же самое, измерение ударной вязкости (призматические образцы с канавкой разрушают ударом на копре, определяя количество энергии, пошедшее на разрушение. Величину этой энергии, отнесенной к площади поперечного сечения образца, и называют ударной вязкостью). Канавки-концентраторы могут быть U-образной и V-образной формы. Соответственно, измеренную ударную вязкость обозначают *KCU* и *KCV*. Существуют еще образцы с наведенной микротрещиной (определяемый параметр КСТ), но последние применяются редко из-за сложности их изготовления. Подобные испытания проводят как при 20 °С, так и при пониженных температурах.

Широко применяются **испытания на загиб** (определяют угол загиба, при котором возникает первая трещина).

**Измерение твердости** также дает ценную информацию. При измерении твердости поверхности нет необходимости производить разрушение детали. Потому метод в этом случае является фактически неразрушающим (отпечатки малы по размеру и не мешают эксплуатации изделия).

Структуру материала шва изучают с помощью **металлографии**. Для этого вырезанный образец шлифуют, полируют, протравливают в специальных металлографических травителях и рассматрива-

ют через лупу или изучают на микроскопе. Если применяют небольшие увеличения (обычно до 20), то говорят о макроструктуре и макрошлифе. При изучении микроструктуры применяют большие увеличения (до 1000).

По макрошлифу можно определить форму и поперечные размеры шва, выявить геометрические и сварочные дефекты (см. рис. 12, 32–34). По микрошлифу определяют, в первую очередь, микроструктуру участков шва, ЗТВ и основного металла, что позволяет во многих случаях предсказывать поведение сварного соединения в различных условиях.

Часто на микрошлиф наносят отпечатки микротвердомера. Так, на рис. 34, б видно, что в ЗТВ (выглядит как белая полоска) произошла сильная подкалка (отпечаток маленький, значит твердость велика). Это дает основание опасаться хрупкого разрушения сварного соединения в данном месте (при испытаниях так и происходило).

Рассматривая поверхность излома, можно определить, какое разрушение имело место — вязкое, хрупкое или усталостное. Во многих стандартах нормируется процент вязкой составляющей в изломе. Определив долю вязкой составляющей, можно, в частности, судить, допустимо ли эту сталь применять при данных температурах.

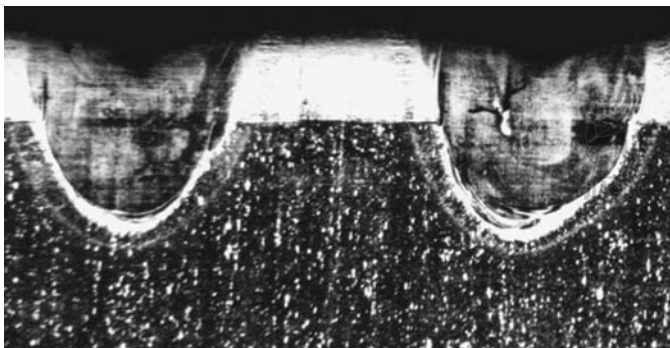
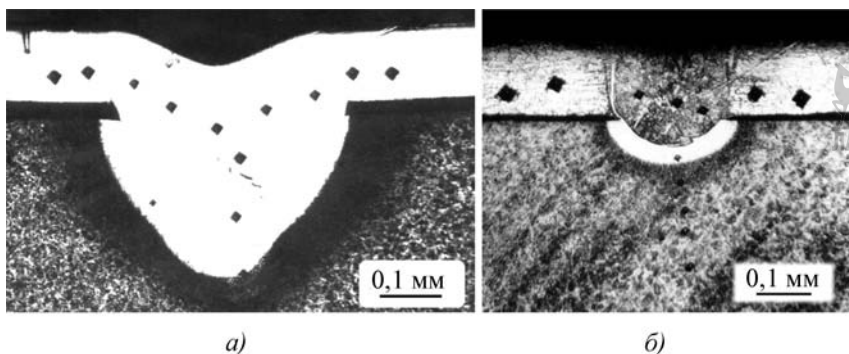


Рис. 33. Усадочная раковина в сварных точках, выполненных точечной лазерной сваркой.  $\times 100$



**Рис. 34. Отпечатки микротвердомера на поперечных шлифах сварных точек, выполненных точечной лазерной сваркой:**

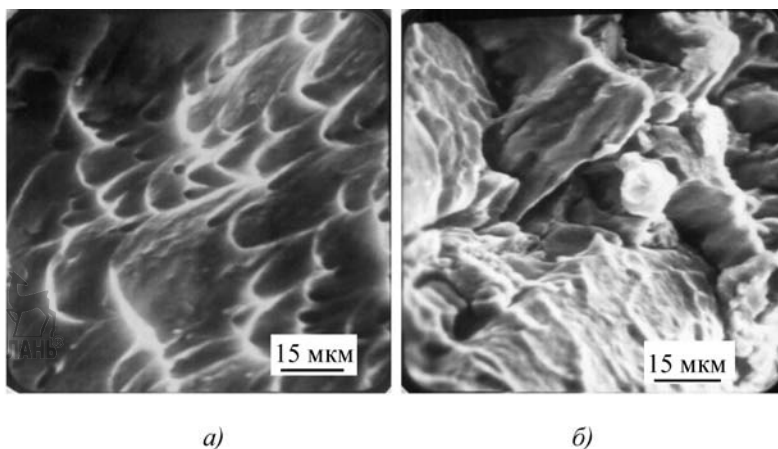
*а* — сварка коррозионно-стойких сталей 08Х18Н10 и 95Х18Ш; *б* — сварка стали 08КП (верхний лист) и ШХ15 (нижний)

Изображение поверхности изломов называется *фрактографией*. Так как глубина фокуса у оптических микроскопов мала, а поверхность излома неровная, то для фрактографии лучше применять растровые электронные микроскопы, обеспечивающие значительно бóльшую глубину резкости (рис. 35).

При контроле сварных сосудов, особенно работающих под давлением, большое значение приобретает проверка их герметичности. Последнее может осуществляться различными способами. Простейший способ: сосуд наполняют водой, рабочей жидкостью или газом и контролируют утечки либо визуальным, либо измеряя уровень и давление среды в сосуде.

До сих пор еще применяется так называемая керосиновая проба: с одной стороны контролируемую стенку натирают мелом, с другой — смачивают керосином. Керосин очень легко проходит через мельчайшие трещины, а на мелованной поверхности дает четкие следы. Можно таким образом находить и несквозные трещины: поверхность смачивается керосином, затем тщательно протирается и покрывается мелом. Керосин из трещин будет выходить и на мелованной поверхности давать следы.

В последнее время вместо керосина и мела применяют специальные составы в аэрозольных баллончиках (так называемый поверх-



**Рис. 35. Фрактограммы, полученные с помощью растрового электронного микроскопа.  $\times 600$ :**

*a* — вязкий излом; *б* — хрупкий

ностно-капиллярный метод или ПВК). Обычно последовательно применяются пенетрант (проникает в несплошности), очиститель (очищает поверхность от пенетранта) и проявитель (взаимодействуя с выходящим из несплошностей пенетрантом, выявляет эти несплошности).

Еще более эффективно применение гелиевых течеискателей. Гелий легко проходит через мельчайшие поры и микротрещины, и, регистрируя его следы на противоположной стенке, можно сделать вывод о наличии течи. Наибольшая чувствительность этого метода обеспечивается при создании с одной стороны контролируемой стенки разрежения или вакуума.

## Глава 5

### БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА ПРИ СВАРКЕ

---

---

*Техника безопасности* — совокупность технических и организационных мероприятий, направленных на создание безопасных и здоровых условий труда. Ответственность за технику безопасности на предприятии несет администрация этих предприятий.

Основными опасностями и вредностями, приводящими к производственным травмам при сварке, являются:

- поражение электрическим током;
- поражение зрения и открытых кожных покровов различного рода излучениями;
- отравление организма вредными аэрозолями, газами, пылью и испарениями, выделяющимися при сварке (из сварочных аэрозолей наиболее вредные — это аэрозоли марганца, концентрация которого уже при  $0,3 \text{ мг/м}^3$  может вызвать заболевание нервной системы);
- ожоги, опасность пожара;
- травмы от взрывов баллонов, ацетиленовых генераторов и т.п.;
- механические травмы;
- радиационное поражение при радиографическом контроле сварных соединений.

Электробезопасность обеспечивается надежной изоляцией электрооборудования, применением электроблокировок и защитных ограждений, заземлением электрооборудования, ограничением рабочих напряжений (при дуговой сварке не выше 90 В переменного и 80 В постоянного тока); работой в сухой и прочной спецодежде, обуви без металлических шпилек, применением индивидуальных средств защиты (резиновый коврик, боты и пр.); соблюдением условий работы (прекращение работы при дожде и снегопаде при отсутствии укрытия, ремонт сварочного оборудования только электриками, а не сварщиками и т.п.).

При сварке световое излучение оказывает ослепляющее воздействие и вредно действует на глаза, так как чаще всего оно значительно превышает безопасные пороги. Если, как в случае с дуговой сваркой, в спектре присутствует ультрафиолет, то воздействие све-

тового потока на глаза еще усиливается, и излучение может привести к ожогам даже на коже. Тепловое инфракрасное излучение при длительном воздействии также ведет к повреждению зрения (катаракте) и вызывает ожоги кожи.

Защита от сварочного излучения зависит от типа и мощности сварки и расстояния до источника излучения. Так, для защиты лица и зрения сварщиков при дуговой сварке применяют защитные маски или шлемы со светофильтрами. Плотность светофильтра зависит от мощности дуги и отражающей способности расплава (к примеру, при сварке алюминиевых сплавов или сварке в инертных газах плотность светофильтра увеличивают на одну ступень).

В последнее время все чаще применяют регулирующиеся и саморегулирующиеся светофильтры, так называемые «хамелеоны». Для защиты зрения вспомогательных рабочих, находящихся на большем расстоянии от источника излучения, применяют темные защитные очки.

Для защиты кожи используют спецодежду из плотного брезента, кожи, в некоторых случаях даже из асбеста. Место сварки желательно поместить в закрытой кабине либо прикрыть переносными щитами для защиты зрения не занятого непосредственно в сварке обслуживающего персонала.

Для защиты зрения при газовой сварке достаточно применять очки с темными стеклами. При электроконтактной, ультразвуковой, механических видах сварки достаточно использовать защитные очки с прозрачными стеклами для защиты глаз только от механических повреждений. Применяется обычная рабочая спецодежда.

Для защиты от сварочных аэрозолей при сварке в закрытых помещениях необходимо иметь исправную и работающую местную и/или общую вытяжную или приточно-вытяжную вентиляцию, применять автоматические методы сварки с удалением оператора из рабочей зоны, заменять вредные процессы и материалы на менее вредные, использовать при необходимости средства индивидуальной защиты (выпускаются сварочные шлемы с индивидуальной подачей очищенного воздуха).

В целях обеспечения пожарной безопасности легковоспламеняющиеся материалы должны быть удалены не менее чем на 30 м от

места проведения сварочных работ, а горючие (дерево и т.п.) — не менее чем на 5 м. При невозможности удаления такие материалы обливаются водой или защищаются стальными или асбестоцементными листами. Рабочие места должны быть оснащены противопожарным оборудованием (огнетушителем, кошмой, песком или хотя бы емкостью с водой).

## Глава 6

### ПОНЯТИЕ ОБ АТТЕСТАЦИЯХ

---

---

Для обеспечения высокого и, главное, постоянного уровня качества сварки необходимо удостовериться, что все объекты, субъекты и элементы сварочного процесса отвечают определенным требованиям. Проверку соответствия их этим требованиям и называют аттестацией.

Проводят аттестацию:

- технологии сварки;
- сварочного оборудования и сварочных материалов;
- сварщиков и специалистов сварочного производства.

Аттестация технологии подразделяется на исследовательскую и производственную. Исследовательская аттестация проводится при подготовке к применению новых сварочных технологий и осуществляется головными отраслевыми научно-исследовательскими институтами.

Производственную аттестацию проводят только при положительных результатах исследовательской и осуществляют ее аттестационные центры по заявкам организаций-заявителей. Производственная аттестация — проверка технических, организационных возможностей и квалифицированных кадров, для выполнения сварки по данной технологии.

Производственную аттестацию подразделяют на первичную, периодическую и внеочередную. Первичную проводят, если организация-подрядчик впервые начинает использовать данную технологию сварки или при внесении изменений в технологию.

Периодическая проводится каждые 3 года, при условии, что не было перерывов в работах более полугода. Внеочередную аттестацию проводят по требованию контролирующего органа при систематическом невыполнении организацией технологии сварки или неудовлетворительном качестве сварочных работ. Новое сварочное оборудование и новые партии сварочных материалов подлежат аттестации.

Аттестацию сварщиков подразделяют на:

- первичную;

- дополнительную;
- периодическую;
- внеочередную.

**Первичной аттестации** подвергаются сварщики, не имевшие ранее допуска к данному виду сварки на данном типе объектов (например, ручной дуговой сварке на магистральных трубопроводах). Первичная аттестация проводится по программам, согласованным с Госгортехнадзором России.

При положительном результате первичной аттестации сварщику присваивается 1-й уровень профессиональной подготовки — аттестованный сварщик.

**Дополнительную аттестацию** аттестованные сварщики проходят перед их допуском к сварочным работам, не указанным в их аттестационных документах.

В целях подтверждения уровня своей профессиональной квалификации с определенной периодичностью сварщики должны проходить **периодическую аттестацию** (при работе на объектах повышенной опасности, таких, например, как магистральные трубопроводы, периодическая аттестация обычно ежегодная).

На **внеочередную аттестацию** направляются сварщики, отстраненные от работы за нарушение технологии сварки или регулярное неудовлетворительное качество выполненных ими сварных соединений (обычно после трех документально зафиксированных замечаний). Дополнительные, периодические и внеочередные аттестации обычно проводятся по тем же программам, что и первичная.

Другие специалисты сварочного производства также проходят аттестацию (аттестованный мастер — сварщик, аттестованный технолог — сварщик, аттестованный инженер — сварщик). Причем система аттестации определяет не только необходимые уровни их профессиональной подготовки, но и предъявляет определенные требования и к их базовому техническому образованию.

Результаты аттестаций направляются в Аттестационный Центр Национального Агентства Контроля и Сварки (НАКС) для внесения в единый Реестр системы аттестации. Правила и условия проведения всех видов аттестаций подробно изложены в соответствующих нормативных документах.

Перед началом сварочных работ на объекте сварщики выполняют сварку допускных стыков. На **допускные испытания** аттестован-

ные сварщики направляются при существенных технологических изменениях процесса сварки (изменений в соответствующих технологических картах), если в последние 3 месяца они не выполняли работ по этим технологическим картам. Допускные испытания могут быть совмещены с аттестацией технологии сварки. Срок действия допускного листа на весь период выполняемой работы при условии, что не было перерывов в работе более 3 месяцев.

Допускные испытания состоят из сварки одного (иногда двух) допускных сварных соединений (стыков). Единолично или в составе бригады, всего шва, или какой-либо его части (прохода) (все должно быть точно так же, как и при сварке рабочих стыков).

Стык варится в присутствии технического надзора при обеспечении непрерывного пооперационного контроля и последующей оценки как качества отдельных операций, так и общего качества стыка с помощью визуально-измерительного контроля, радиографического контроля и механических испытаний.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

---

---

1. **Иллюстрированное пособие** сварщика / Сост. В.А. Лосев, Н.А. Юхин. М.: «Соуэло», 2004. 57 с.
2. **Сварочно-монтажные работы** в трубопроводном строительстве / А.Ф. Суворов, Г.Г. Васильев, Ю.А. Горяинов и др. М.: ЗАО «Звезда», 2006. 240 с.
3. **Сварка** трубопроводов / Ф.М. Мустафин, А.Ф. Суворов, Г.Г. Васильев и др. М.: Недра, 2002. 350 с.
4. **Чернышов Г.Г.** Сварочное дело. Сварка и резка металлов: учебник. М.: Академия, 2007. 496 с.
5. **Сварка** и резка материалов: учеб. пособие / М.Д. Банов, Ю.В. Казаков, М.Г. Козулин и др. М.: Академия, 2006. 400 с.
6. **Сварка.** Введение в специальность: Учеб. пособие для вузов / В.А. Фролов, В.В. Пешков, А.Б. Коломенский, В.С. Казаков; Под ред. В.А. Фролова. М.: Интермет Инжиниринг, 2004. 293 с.
7. **Фролов В.А. и др.** Лабораторный практикум по технологическим основам сварки и пайки: учеб. пособие. М.: Интермет Инжиниринг, 2006. 272 с.
8. **Сварка.** Резка. Контроль: справочник. В 2-х т. / Под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышева. М.: Машиностроение, 2004.
9. **Владимиров А.И., Кершенбаум В.Я.** Эксплуатационная надежность и прочностной ресурс сварных стыков технологических трубопроводов: учеб. пособие. М.: Национальный ин-т нефти и газа, 2006. 184 с.
10. **ГОСТ 5264–80.** Ручная дуговая сварка. Соединения сварные.
11. **ГОСТ 14771–76.** Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные.

## Приложение

### ОКАЗАНИЕ ПЕРВОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ

---

---

Говорят, что выздоровление на 70 % зависит от того, как оказывалась первая помощь, и только на 30 % — от последующего лечения. Каждый из нас может оказаться свидетелем несчастного случая. Не будьте пассивными, но и не впадайте в панику. Не трясите пострадавшего, не делайте элементарных ошибок, как, например, заливание раны йодом. Ни одному пострадавшему не стало еще от этого лучше. Действуйте быстро и грамотно. А для этого прочитайте, а лучше заучите эту краткую памятку.

#### Поражение электрическим током

— Обесточить установку путем полного отключения ее от сети. Если это невозможно, освободить пострадавшего от действия напряжения и оттащить от установки. Для этого использовать непроводящие предметы (например, сухую деревянную палку). Оттаскивать пострадавшего надо за одежду (если она сухая и отстает от тела, иначе Вы сами можете быть поражены током). Для изоляции своих рук можно использовать сухие кожаные или вязаные перчатки, верхнюю одежду (особенно с синтетическим покрытием). В крайнем случае — несколько листов плотной сухой бумаги, общую тетрадь. Не используйте тонкие тетради, Вы можете получить удар током через металлические скрепки.

— При остановке сердца или прекращении дыхания — освободить пострадавшего от сковывающей одежды, уложить на спину и делать искусственное дыхание «изо рта в рот» или «изо рта в нос» (15...20 вдуваний в минуту) и непрямой массаж сердца путем резкого надавливания ладонями на область 4-5-го ребра слева от грудины (60...70 раз в минуту). Если помощь оказывают двое, то искусственное дыхание и массаж делать одновременно, если один человек, то попеременно (одно вдувание на 5-6 толчков). Искусственное дыхание и массаж сердца делать до появления самостоятельного дыхания и прекращения сердечной фибрилляции. После этого пострадавшего перевернуть со спины на бок.

**ВНИМАНИЕ!** Если пострадавший без сознания, то укладывать его надо на бок — в «позу эмбриона», а никоим образом не на спину — лежа на спине, он может задохнуться от запавшего языка.

— После возвращения сознания дать внутрь кофеин, анальгин, амидопирин. При возможности подкожно ввести промедол, кофеин, эфедрин.

— Вызвать врача из медпункта или скорую помощь по телефону 03.

### Ожоги

— Прежде всего, погасить на пострадавшем горящую одежду или сдернуть ее. Гасить обливанием водой (огнетушители для этого использовать нежелательно) или заворачиванием в плотную, плохо горящую ткань. При ожоге кипятком как можно быстрее освободить от одежды, пропитанной горячей жидкостью.

— При небольших ожогах (краснота, пузыри) протереть место ожога тампоном с перекисью водорода и наложить повязку, смоченную в растворе марганцевокислого калия или пищевой соды. Обратиться к врачу.

— При сильных ожогах (разрушение, обугливание кожи) место ожога **не** обрабатывать! Только наложить сухую стерильную повязку. Рекомендуется пострадавшему принять внутрь, а еще лучше сделать инъекцию из болеутоляющих и сердечных средств (1 мл морфина, промедола, пантопона, камфары). Немедленно вызвать скорую помощь.

**НЕЛЬЗЯ!** Отрывать лоскуты кожи, прокалывать пузыри, отрывать от кожи остатки одежды (если, конечно, последняя уже не горит), смазывать поверхность ожогов любыми жирами.

### Ранения

— Очистить рану, убрать из раны грязь тампоном, смоченным перекисью водорода.

— При малых ранках и порезах — смазать их 3...5 %-ной настойкой йода или раствором бриллиантовой зелени («зеленкой»), царапины заклеить клеем БФ-6.

При значительных ранах — смазать кожу вокруг раны раствором йода или бриллиантовой зелени, а саму рану — раствором иодиола (при его наличии). Припудрить рану порошком стрептоцида и наложить асептическую повязку.

**ВНИМАНИЕ!** Смазывать, а тем более заливать рану раствором йода или зеленки ни в коем случае нельзя!

— При венозном или капиллярном кровотечении наложить давящую повязку. При артериальном (пульсирующем) кровотечении выше раны наложить жгут (затянуть до прекращения обильного кровотечения). Максимальное время наложения жгута — не более 1...1,5 часов. После этого жгут ослабить на несколько минут и, если кровотечение возобновляется, затянуть вновь. Желательно под жгут подкладывать записку со временем его наложения.

— Временно артериальное кровотечение может быть остановлено прижатием соответствующего сосуда выше раны пальцем.

— Вызвать скорую помощь или проводить пострадавшего в больницу или медпункт (кроме случаев мелких порезов).

### **Засорение глаз**

— Удалить соринку чистой влажной ваткой, желательно смоченной в растворе борной кислоты. Закапать раствор альбумида. Нельзя тереть глаза или вылизывать соринку.

### **Попадание яркого светового излучения в глаз**

*(излучения сварки и т.п.)*

— При рези в глазу (ощущения «песка») закапать в глаз 1–2 капли раствора альбумида.

### **Ушибы**

— Ушибы конечностей, как правило, неопасны. Желательно смазать кожу в месте удара настойкой йода и наложить холодный компресс.

— При ударах в голову, грудь, живот необходимо обеспечить покой, дать противошоковые средства (по крайней мере, анальгин) и вызвать врача. При ушибе в области живота нельзя ни есть, ни пить.

### **Растяжения, разрывы связок, вывихи, переломы**

*Признаками травмы служит резкая боль, припухлость, кровоподтек (синяк).*

— Основное — наложение шины для иммобилизации (при растяжении достаточно тугой повязки). Вывихи самостоятельно не вправлять! Внутрь анальгин или амидопирин. На поврежденное место можно положить сухой холод. Вызвать врача или скорую помощь. Если перелом открытый, то дополнительно выполнять действия, как при ранении.

### **Острая сосудистая недостаточность**

*Проявляется в общей резкой слабости, сердцебиении, боли в области сердца.*

— Придать пострадавшему полусидячее положение, освободить от стягивающей одежды, обеспечить полный покой. Внутрь дать кофеин, кордиамин, валидол (под язык) или ввести подкожно 1 мл 10 %-ного раствора кофеина, камфарного масла. Вызвать врача.

### **Обморок**

*Признаки: резкая бледность, холодный пот, потемнение в глазах, шум в ушах, поверхностное дыхание, потеря сознания.*

— Уложить (на бок при потере сознания), расстегнуть одежду, обрызгать лицо и грудь холодной водой, дать понюхать ватку с нашатырным спиртом. Пришедшему в сознание дать крепкий чай, кофе, сердечные средства. При длительном обмороке ввести раствор кофеина, камфарного масла.

Учебное издание

**ФЕДОСОВ Сергей Александрович,  
ОСЬКИН Игорь Эдуардович**

## ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ

Редактор *Е.Д. Макаренко*

Дизайнер *Н.А. Свиридова*

Корректор *Л.И. Сажина*

Инженер по компьютерному макетированию *А.Д. Деева*

Сдано в набор 01.02.2011. Подписано в печать 16.06.11.

Формат 60×88<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Гарнитура Newton.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 7,84. Уч.-изд. л. 5,47.

Тираж 500 экз. Заказ

ООО «Издательство Машиностроение»,

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Отпечатано в ГУП ППП «Типография «Наука» РАН»,

121099, Москва, Шубинский пер., 6



---

# СПРАВОЧНИК СВАРЩИКА

**О.Г. Быковский,  
С.Г. Петренко, В.В. Пешков**

---

**Цена 500 р.**

2011. – 336 с. ISBN 978-5-94275-557-7

В справочнике систематизирована информация о свариваемости сплавов на железной основе, технических возможностях известных электродных материалов и способов электрической и газовой сварки, наплавке и напыления сталей и сплавов. Приведены параметры, режимы этих технологических процессов, технические характеристики современного оборудования для ручных и механизированных способов сварки, резки, наплавки и напыления при изготовлении металлоконструкций.

Рассчитан на специалистов, работающих в области сборочно-сварочного производства, будет полезен студентам, обучающимся по специальности “Оборудование и технология сварочного производства” в учебных заведениях всех уровней аккредитации и рабочим-сварщикам.

---

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку  
в отдел продаж, маркетинга и рекламы:

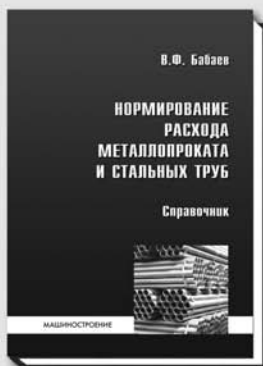
по почте: 107076, г. Москва, Стромьинский пер., 4;

по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительную информацию можно получить по телефонам:

(499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

---



---

# НОРМИРОВАНИЕ РАСХОДА МЕТАЛЛОПРОКАТА И СТАЛЬНЫХ ТРУБ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ: справочник

**В.Ф. Бабаев**

---

**Цена 500 р.**

2010. – 160 с.

ISBN 978-5-94275-498-3

Приведена методика расчета норм расхода металлопроката (сортовой прокат, листовой прокат, рулонные материалы и др.) и стальных труб, широко применяемая в машиностроении и металлообработке, с учетом стоимости материала, типа производства, размера квартальной потребности в прокате, метода раскроя материала (на штучные или групповые заготовки, комбинированный раскрой) и т.п. Учтены передовые формы организации производства и другие достижения по экономному расходованию материалов.

Для специалистов и инженерно-технических работников предприятий, научно-исследовательских организаций, занимающихся вопросами нормирования расхода и эффективного использования материальных ресурсов; также полезен преподавателям и студентам вузов.

---

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку  
в отдел продаж, маркетинга и рекламы:

по почте: 107076, г. Москва, Стромьинский пер., 4;

по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительную информацию можно получить по телефонам:

(499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

---

## **ВНИМАНИЕ!**

Заявки на книги издательства «Машиностроение»  
присылайте по адресу:  
107076, Москва, Стромьинский пер., д. 4

Е-mail: [realiz@mashin.ru](mailto:realiz@mashin.ru)

факс: (499) 269-48-97

тел.: (499) 269-69-00

(499) 269-52-98

**В заявке обязательно указывайте  
свой почтовый адрес!**

Подробная информация  
о книгах и журналах издательства  
на сайте [www.mashin.ru](http://www.mashin.ru)