

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
"Воронежский государственный технический университет"

Кафедра автоматизированного оборудования  
машиностроительного производства

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению лабораторных работ  
для студентов направления подготовки 15.03.01  
«Машиностроение», профиля «Технологии, оборудование, автоматизация ма-  
шиностроительных производств»  
всех форм обучения

Воронеж 2021

УДК 621.01(07)  
ББК 34.5я7

**Составители:**

д-р техн. наук, проф. С. Ю. Жачкин,  
канд. техн. наук, доц. М. Н. Краснова

**Физические основы восстановления деталей машин:** методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов направления подготовки 15.03.01. «Машиностроение», профиля «Технологии, оборудование, автоматизация машиностроительных производств» всех форм обучения / ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет"; сост.: С. Ю. Жачкин. М. Н. Краснова. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. -38 с.

Приводятся краткие теоретические сведения, необходимые для выполнения лабораторных работ при изучении дисциплины «Физические основы восстановления деталей машин», а также контрольные вопросы для закрепления материала.

Методические указания предназначены для студентов направления подготовки 15.03.01 «Машиностроение», профиля «Технологии, оборудование, автоматизация машиностроительных производств» всех форм обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде в текстовом редакторе MS WORD и содержатся в файле МУ. ЛР ФОВДМ.pdf.

Ил. 23. Табл. 5. Библиогр.: 3 назв.

**УДК 621.01(07)**  
**ББК 34.5я7**

**Рецензент** – С. Н. Яценко, канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета  
Воронежского государственного технического университета*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Цель изучения дисциплины: освоение материалов в области ремонтного машиностроительного производства, технологии восстановления деталей машин и повышения работоспособности оборудования.

Используя базовые методы исследовательской деятельности, студент участвует в работе над инновационными проектами. Научится выбирать основные и вспомогательные материалы и способы реализации основных технологических процессов и применять прогрессивные методы эксплуатации технологического оборудования при изготовлении изделий машиностроения. А также приобретет умение применять методы стандартных испытаний по определению физико-механических свойств и технологических показателей используемых материалов и готовых изделий.

# Лабораторная работа 1

## Использование сварки при восстановлении деталей

Цель работы - изучить конструкцию и принцип действия сварочных аппаратов для ручной дуговой сварки. Освоить навыки выбора сварочного оборудования, электродов и параметров режима сварки.

Дугой называют мощный устойчивый электрический разряд в ионизированной газовой среде между электродом и изделием.

В зависимости от того, в какой среде происходит горение электрической дуги, различают:

- открытую дугу, горящую на воздухе (состав газовой среды в зоне дуги - воздух с примесью паров свариваемого металла, материала электродов и электродных покрытий);
- закрытую дугу, горящую под слоем флюса (пары основного металла, проволоки и защитного флюса);
- электрическую дугу, горящую в среде защитных газов (атмосфера защитного газа, пары основного металла и сварочной проволоки).

Как показано на рис. 1, сварку можно вести плавящимся (металлическим) электродом или с использованием неплавящегося (угольного или вольфрамового) электрода.

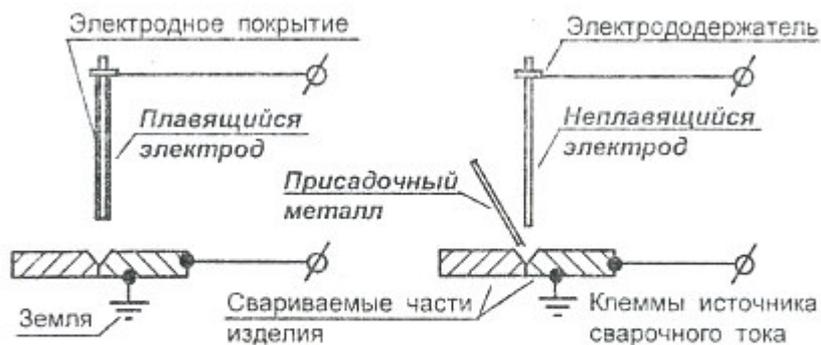


Рис. 1.1. Сварка плавящимся и неплавящимся электродами

Между торцом неплавящегося электрода и свариваемым изделием горит электрическая дуга. Присадочный металл вводится в зону горения сварочной дуги дополнительно. Он расплавляется и формирует сварной шов. Плавящийся электрод сочетает функции неплавящегося электрода и присадочного металла.

При электрической дуговой сварке электрическая энергия преобразуется в тепловую энергию, которая концентрированно вводится в свариваемые заготовки и оплавляет их в месте соединения.

Полная тепловая энергия, выделяемая при горении сварочной дуги:

$$Q_n = I \cdot U \cdot \tau,$$

где  $I$  - сила сварочного тока, А;  $U$  - напряжение сварочной дуги, В;  $\tau$  - время сварки, с.

Однако не вся тепловая энергия, выделяющаяся при горении сварочной дуги, расходуется на нагрев и расплавление основного металла и электрода. Часть тепловой энергии расходуется на плавление отдельных компонентов покрытия и образование газов, а часть тепловой энергии рассеивается в окружающей среде.

Эффективной тепловой энергией называют полезно используемую при сварке теплоту:

$$Q_{эфф} = \eta \cdot I \cdot U \cdot \tau,$$

где  $\eta$  - коэффициент полезного использования тепловой энергии сварочной дуги.

Коэффициент полезного использования тепловой энергии сварочной дуги ( $\eta$ ) зависит от конкретных условий сварки. Так, при ручной дуговой сварке величина этого коэффициента может колебаться в пределах  $\eta = 0,6 \dots 0,82$ .

В процессе сварки плавящиеся электроды нагреваются двумя источниками:

- тепловой энергией сварочной дуги  $Q_{эфф}$ ;
- теплотой, выделяющейся при протекании электрического тока на вылете электрода (длина электрода от электродержателя до конца электрода)  $Q$ .

Тепло, выделяемое на вылете электрода  $Q$ , рассчитывается по закону Джоуля-Ленца:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \tau, \text{ Дж},$$

где  $R$  - сопротивление вылета электрода, ом.

Сопротивление вылета электрода

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \cdot 10, \text{ ом},$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление, ом·см;

$l_{\text{выл}}$  - длина вылета электрода, мм;

$S$  - площадь поперечного сечения электрода, мм<sup>2</sup>.

*Сварочные аппараты и их внешние вольтамперные характеристики*

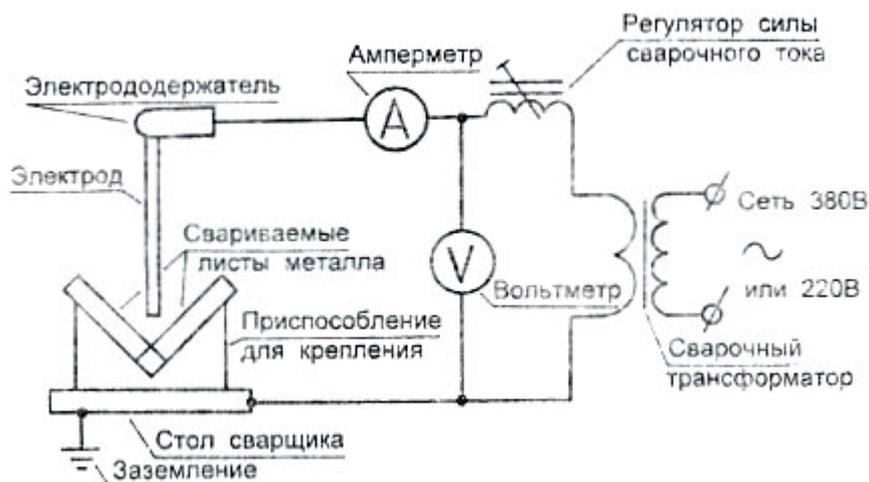


Рис. 1.2. Принципиальная схема сварки переменным током

Дуговую сварку плавлением выполняют постоянным или переменным током (рис. 2...4).

Для сварки переменным током (рис. 2) применяют сварочные трансформаторы. Трансформатор понижает напряжение сети с 380В или 220 В до 70...80 В и менее, одновременно увеличивая силу тока до нужного значения. Для регулирования силы тока используют регуляторы. Они либо выполнены отдельно от трансформатора (см. рис. 2), либо совмещены с трансформатором (см. рис. 6, 7). Амперметр и вольтметр показывают величину силы тока и напряжения при сварке.

Для сварки постоянным током применяют сварочные преобразователи (рис. 3), сварочные агрегаты или сварочные выпрямители (рис. 4). Регуляторы силы тока и здесь выполняют свою роль.

Сварочные преобразователи имеют электрический привод - электродвигатель переменного тока. Вал электродвигателя соединен с валом генератора, который преобразует механическую энергию в постоянный электрический ток. В сварочных агрегатах вал генератора вращается двигателем внутреннего сгорания.

Там, где есть сетевая электроэнергия, используют сварочный преобразователь (электродвигатель + генератор). В полевых условиях, где нет сетевой электроэнергии, используют сварочный агрегат (карбюраторный или дизельный двигатель + генератор).

В настоящее время на многих предприятиях сварочные преобразователи заменяют выпрямителями, так как последние во время работы не шумят и у них больше коэффициент полезного действия. В выпрямительных установках переменный ток с выхода понижающего трансформатора подают на выпрямитель.

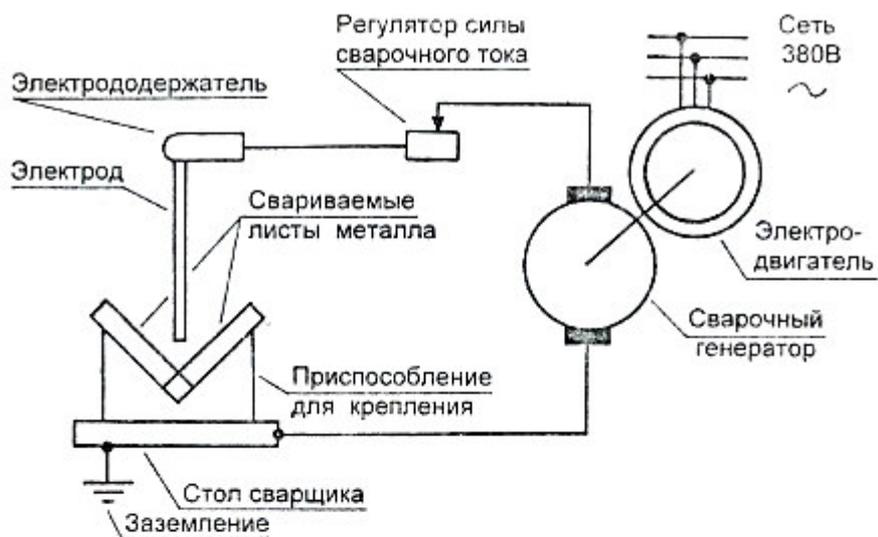


Рис. 1.3. Принципиальная схема сварки постоянным током

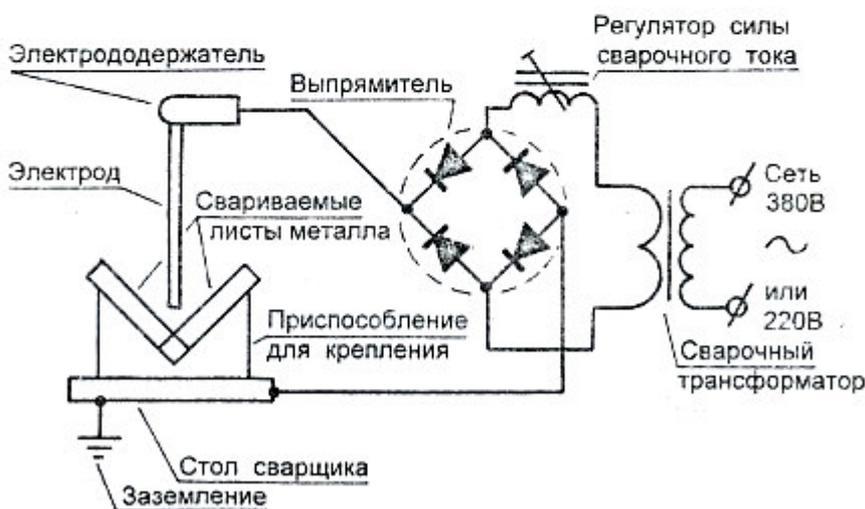


Рис. 1.4. Принципиальная схема сварки выпрямленным током

При сварке постоянным током обеспечивается высокая стабильность горения сварочной дуги и качество сварного соединения. Поэтому высоколегированные стали, из которых изготавливают ответственные конструкции сваривают с использованием постоянного тока.

Основным недостатком сварки постоянным током является меньший, по сравнению со сваркой переменным током, коэффициент полезного действия. Сварочный генератор постоянного тока, вырабатывающий сварочный ток, необходимо приводить в движение электрическим двигателем переменного тока (сварочный преобразователь) или двигателем внутреннего сгорания (сварочный агрегат}. В обоих случаях будут потери на трение движущихся деталей и потери в обмотках электрических машин. Оборудование для сварки постоянным током конструктивно сложнее и стоит дороже.

При ручной дуговой сварке используют источники тока с крутопадающей внешней характеристикой (рис. 5). Внешней вольтамперной характеристикой

называют зависимость напряжения на клеммах источника оттока нагрузки.

К источникам тока для ручной дуговой сварки предъявляют следующие требования:

- напряжение холостого хода должно обеспечивать надежное зажигание сварочной дуги, а также отвечать правилам техники безопасности (не должно превышать  $U_{xx} = 80 \text{ В}$ );
- ток короткого замыкания должен быть ограничен;
- внешняя вольтамперная характеристика источника тока должна быть крутопадающей для ограничения токов короткого замыкания и повышения стабильности горения сварочной дуги;
- источник тока должен быть надежным и простым в эксплуатации.

При малых значениях тока короткого замыкания затрудняется зажигание дуги, а при больших его значениях увеличивается перегрев токоведущих частей и электрода, возрастают потери металла на разбрызгивание. Поэтому у источников тока для ручной дуговой сварки отношение тока короткого замыкания  $I_{кз}$  и сварочного тока  $I_{св}$  должно изменяться в следующих пределах:

$$1,25 < \frac{I}{I} < 2,0 ,$$

Длину дуги поддерживают вручную. Поэтому в процессе сварки возможно изменение ее длины из-за произвольных движений руки сварщика. Источник сварочного тока должен обеспечить устойчивое горение сварочной дуги при изменении ее длины.

Дуга переменного тока зажигается и гаснет 100 раз в секунду. Поэтому для интенсивного первоначального и повторного зажигания дуги при проектировании источников сварочного тока обеспечивают условие:

$$\frac{U_{xx}}{U_0} = 1,8 \div 2,5 ,$$

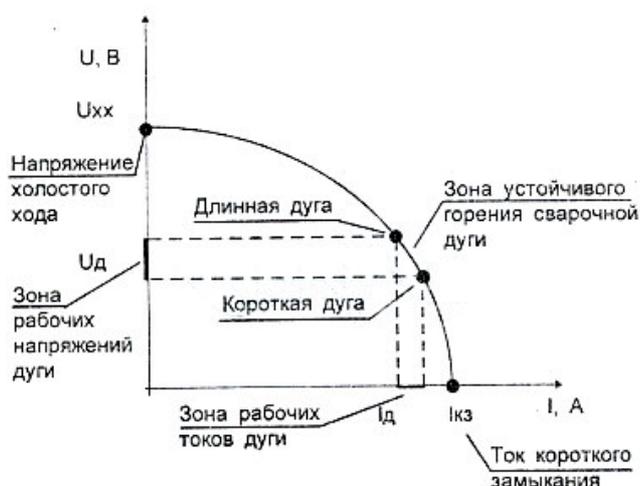


Рис. 1.5. Внешняя вольтамперная характеристика источника тока

Напряжение холостого хода у разных сварочных аппаратов  $U_{xx}=40...80\text{В}$ .

У сварочных аппаратов постоянного тока напряжение холостого хода и рабочее напряжение ниже, чем у трансформаторов благодаря более высокой устойчивости горения сварочной дуги постоянного тока. Более низкое напряжение уменьшает вероятность поражения сварщика электрическим током.

При слишком короткой дуге возможно возникновение режима короткого замыкания и приваривание электрода к изделию. При слишком длинной дуге происходит ее обрыв из-за недостатка подводимой энергии.

При чрезмерно большом токе короткого замыкания возможен пробой и повреждение изоляции обмоток источника сварочного тока.

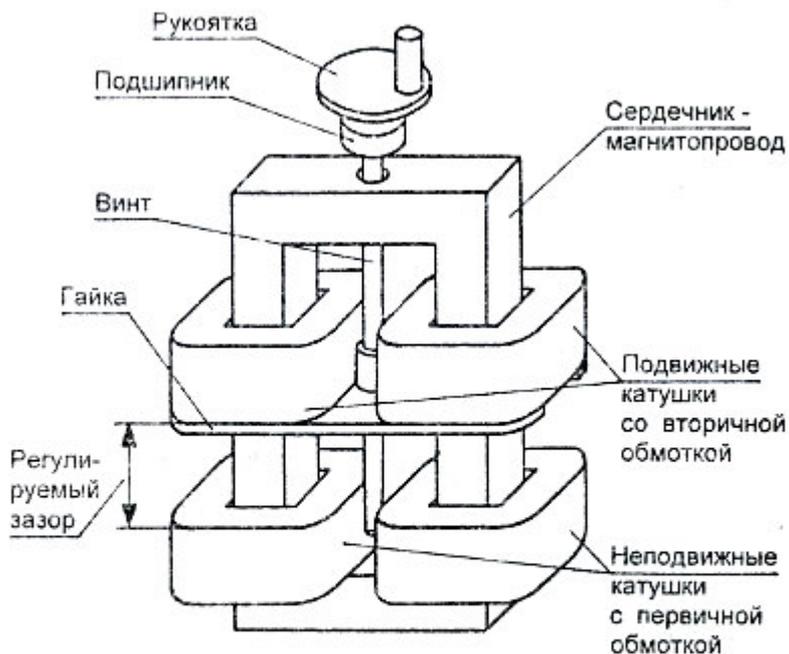


Рис. 1.6. Конструктивная схема сварочного трансформатора с подвижными катушками вторичной обмотки

При прохождении большого тока по электроду, он сильно нагревается по всей длине. При этом может растрескаться и осыпаться электродное покрытие. Тогда будет затруднено повторное зажигание дуги.

### *Конструкция сварочного трансформатора*

Пределы регулирования сварочного тока  $I_{св}$  трансформатора ТД-300 составляют 60...400 А. Напряжение холостого хода 61 и 79 В. Рабочее напряжение равно 30 В.

Основными элементами сварочного трансформатора (рис. 6, 7) являются:

- сердечник (магнитопровод);
- неподвижные катушки с первичной обмоткой;
- подвижные катушки со вторичной обмоткой.

Величину сварочного тока регулируют изменением расстояния между

первичными и вторичными катушками благодаря подвижным вторичным катушкам.

Катушки первичной обмотки неподжны. Катушки вторичной обмотки лежат на большой плоской гайке. При вращении рукоятки, соединенный с ней винт вкручивается в эту гайку.

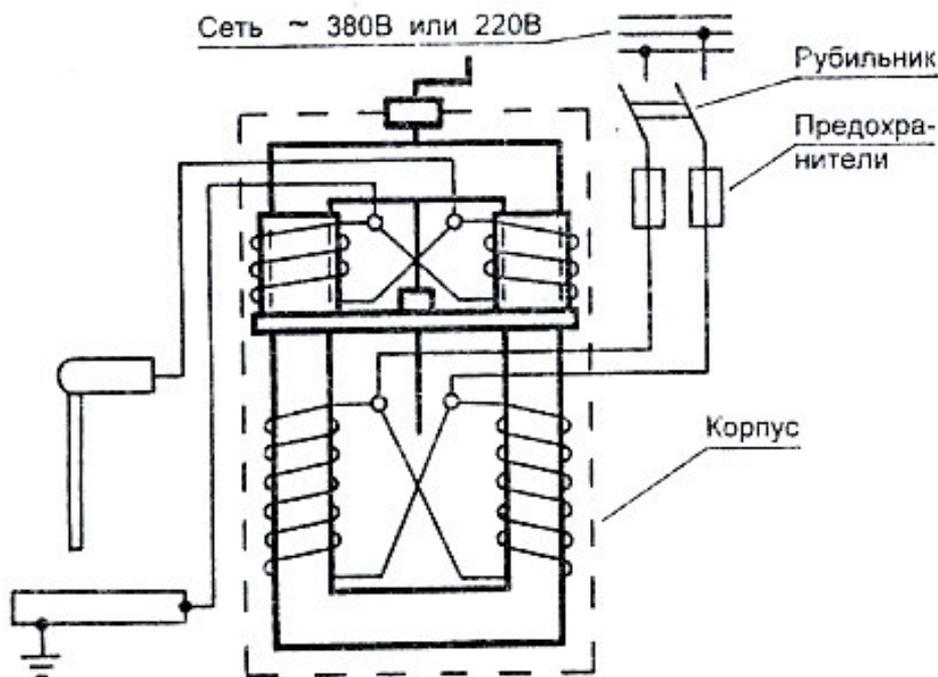


Рис. 1.7. Принципиальная электрическая схема сварочного трансформатора с подвижными катушками вторичной обмотки

Винт через упорный подшипник связан с корпусом трансформатора. При вращении рукоятки винта гайка поднимается или опускается по винту вместе с вторичной обмоткой. Происходит плавное изменение силы сварочного тока.

При увеличении расстояния между обмотками уменьшается магнитный поток, пронизывающий вторичную катушку. Чем больше зазор, тем большая часть магнитного потока теряется за счет рассеивания в пространстве. Поэтому сварочный ток уменьшается. Уменьшение расстояния между обмотками приводит к увеличению тока.

## Режимы работы сварочного трансформатора

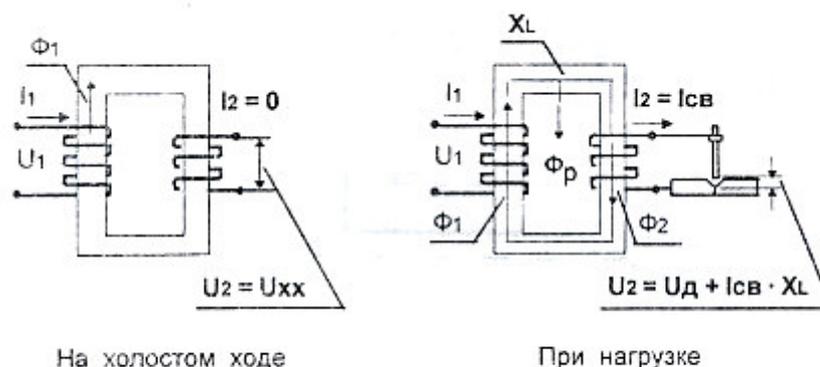


Рис. 1.8. Работа трансформатора

Действие сварочного трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции.

Режим холостого хода трансформатора (рис. 8) устанавливают при разомкнутой вторичной обмотке в момент подключения первичной обмотки к сети переменного тока с напряжением  $U_1$ . При этом по первичной обмотке идет ток  $I_1$ , который создает переменный магнитный поток  $\Phi_1$ . Этот поток индуцирует во вторичной обмотке переменное напряжение  $U_2$ . Поскольку цепь вторичной обмотки разомкнута, то ток в ней не идет  $I_2 = 0$  и никаких затрат энергии во вторичной цепи нет. Поэтому вторичное напряжение на холостом ходе максимально и эту величину называют напряжением холостого хода  $U_2 = U_{xx}$ .

Отношение напряжений первичной и вторичной обмоток при холостом ходе называют коэффициентом трансформации  $K$ . Он также равен отношению чисел витков первичной обмотки  $w_1$  и вторичной обмотки  $w_2$ .

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2},$$

В сварочных трансформаторах сетевое напряжение 220 В или 380 В преобразуется в более низкое напряжение холостого хода  $U_2 = U_{xx} = 60 \dots 80 \text{ В}$ ,

Режим нагрузки (см. рис. 8) устанавливают благодаря замыканию цепи вторичной обмотки в момент зажигания дуги. При этом под действием напряжения  $U_2$  во вторичной обмотке и дуге появляется ток  $I_2 = I_{св}$ . Этот ток в сердечнике создает переменный магнитный поток, который стремится уменьшить величину потока, создаваемого первичной обмоткой  $\Phi_1$ . Противодействуя этому, сила тока в первичной обмотке увеличивается. Увеличение потребления энергии в первичной обмотке должно быть равно увеличению отдачи энергии дуге вторичной обмоткой в соответствии с законом сохранения энергии.

Напряжение во вторичной обмотке трансформатора при нагрузке равно:

$$U_2 = U_d + I_{св} \cdot X_L,$$

где  $U_d$  - падение напряжения на дуге;

$X_L$  - индуктивное сопротивление сварочного контура.

Омическое сопротивление сварочного контура  $R$ , включая вылет электрода, значительно меньше индуктивного сопротивления  $X_L$ . По этой причине при расчете  $U_2$  величиной  $R$  пренебрегаем.

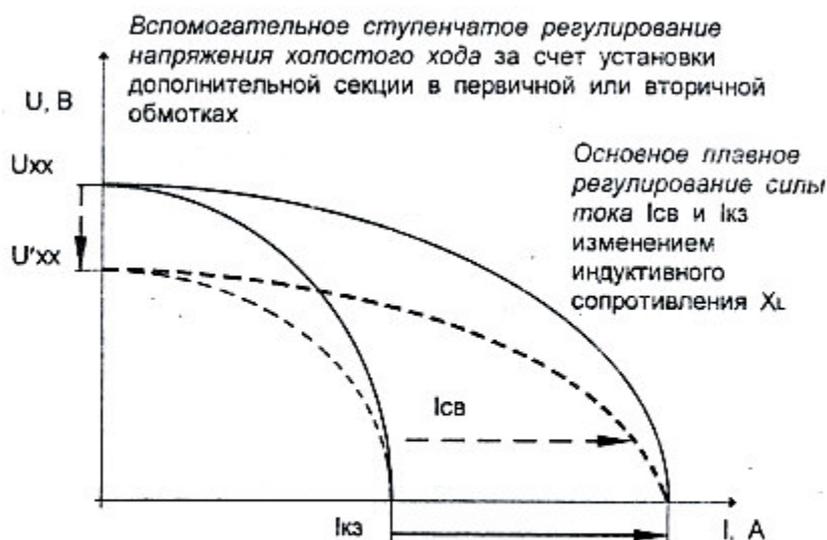


Рис. 1.9. Регулирование силы сварочного тока  $I_{св}$ , силы тока короткого замыкания  $I_{кз}$  и напряжения холостого хода  $U_{хх}$  трансформатора

Часть магнитного потока  $\Phi_r$  по пути от первичной обмотки ко вторичной рассеивается в пространстве. Магнитный поток рассеивания тем больше, чем больше расстояние между обмотками (см. рис. 7 и 8). В результате вторичную обмотку пронизывает магнитный поток  $\Phi_2$ . Падающая внешняя вольтамперная характеристика сварочного трансформатора получается благодаря изменению величины рассеивания магнитного потока  $\Phi_r$ .

При этом напряжение дуги  $U_d$  уменьшается  $U_d = U_2 - I_{св} \cdot X_L$  при увеличении силы сварочного тока  $I_{св}$  и индуктивного сопротивления  $X_L$ .

Как показано на рис. 9, регулировать трансформатор можно:

- изменяя индуктивное сопротивление сварочного трансформатора  $X_L$
- изменяя напряжение холостого хода  $U_{хх}$ .

Первый способ более распространен и позволяет плавно регулировать сварочный ток. Второй способ применяют как дополнительный. Как правило трансформатор имеет одну или две фиксированные величины  $U_{хх}$  и  $U'_{хх}$ .  $U'_{хх}$  получают, устанавливая дополнительные секции в первичной или вторичной обмотках. При величине напряжения холостого хода  $U'_{хх}$ , как и при  $U_{хх}$  можно плавно регулировать индуктивное сопротивление  $X_L$ , а следовательно сварочный ток  $I_{св}$  и ток короткого замыкания  $I_{кз}$ .

Плавное двухдиапазонное регулирование тока позволяет уменьшить массу и габариты трансформатора. Для получения диапазона больших токов обе катушки первичной и вторичной обмоток включаются попарно параллельно, как показано на рис. 6. Для получения диапазона малых токов катушки первич-

ной и вторичной обмоток включаются последовательно.

Регулирование сварочного тока  $I_{св}$  (как и  $I_{кз}$ ) при постоянном напряжении холостого хода трансформатора  $U_{хх}$  возможно только за счет изменения индуктивного сопротивления.

В существующих конструкциях трансформаторов регулирование индуктивного сопротивления вторичной цепи может быть выполнено:

- изменением расстояния между первичной и вторичной обмотками;
- изменением зазора магнитопровода дросселя, выполненного отдельно от трансформатора.

Первый вариант интересен простой и надежной конструкцией. Однако если сваривать необходимо на расстоянии 10...40 метров от трансформатора, то отдельный регулятор будет всегда под рукой у сварщика. Он весит значительно меньше трансформатора. Поэтому его легче перемещать.

При коротком замыкании электрод касается изделия  $K_d = 0$ . Напряжение во вторичной обмотке  $U_2 = I_{кз} \cdot X_L$ . Отсюда:  $I_{кз} = U_2 / X_L$

Следовательно регулирование тока короткого замыкания возможно только за счет изменения индуктивного сопротивления  $X_L$ .

### *Стали и их свариваемость.*

В сварных конструкциях автомобилей, строительных и дорожных машин широко используют конструкционные стали. Стали обладают различной свариваемостью.

Под термином "свариваемость металлов" обычно понимают комплекс свойств свариваемого металла, обеспечивающих хорошую прочность и работоспособность сварного соединения в условиях эксплуатации.

В процессе сварки некоторые стали склонны к образованию трещин в шве или в зонах, прилегающих к шву. Появление этих трещин обуславливается главным образом химическим составом и внутренней микроструктурой стали. Из основных химических элементов, входящих в состав сталей, наибольшее влияние на образование трещин оказывает углерод. Поэтому в сварных конструкциях используют стали с содержанием углерода не более 0,3%.

Легирующие компоненты, вводимые в сталь в небольших количествах, например молибден - 0,2...0,8%, ванадий - 0,1...0,3% и другие, наряду с улучшением механических свойств стали повышают ее свариваемость. Вредные примеси - сера и фосфор, а также оксидные включения и растворенные газы (водород, кислород и азот), ухудшают свариваемость стали.

На образование трещин влияет не только химический состав и структура стали, но также тип конструкции и характер соединения ее узлов.

Обозначение низкоуглеродистой стали начинается со слова Сталь (Сталь 15, Сталь 20 - качественные стали) или начальных букв слова Сталь (Ст 1, Ст 2, Ст 3, Ст 4 - стали обыкновенного качества).

Чем больше цифра в обозначении конструкционной низкоуглеродистой стали обыкновенного качества (Ст 1, Ст 2, Ст 3, Ст 4), тем выше содержание углерода.

Цифра в обозначении качественной низкоуглеродистой конструкционной стали показывает содержание углерода в сотых долях процента. Например Сталь 10 содержит 0,10% углерода. В табл. 1 приведены условные обозначения легирующих элементов в марках сталей и марках сварочных проволок.

В обозначении легированных сталей, например 09Г2Д цифры 09 показывают содержание углерода в сотых долях процента -

0,09% С. Буквы справа от цифры обозначают легирующий элемент: Г - марганец; Д - медь. Цифра после буквы указывает содержание легирующего элемента в целых процентах. Отсутствие цифры указывает на содержание элемента менее 1%.

Таблица 1

Условные обозначения легирующих элементов в марках сталей и марках сварочных проволок

Элемент	Обозначение		Элемент	Обозначение	
Ниобий	НЬ	Б	Бор	В	Р
Вольфрам	W	В	Кремний	Si	С
Марганец	Mn	Г	Титан	Ti	Т
Медь	Cu	Д	Ванадий	V	Ф
Кобальт	Co	К	Хром	Cr	Х
Молибден	Mo	М	Цирконий	Zr	Ц
Никель	Ni	Н	Алюминий	Al	Ю

Исследования и опыт применения сварки в промышленности позволяют оценить с некоторым приближением каждую марку стали с точки зрения свариваемости как весьма высокую, высокую, удовлетворительную и низкую. Эти оценки приводятся в справочной литературе.

В индивидуальных заданиях на практическую работу стали, из которых предложено изготовить ванну обладают весьма высокой и высокой свариваемостью.

#### *Электроды для ручной дуговой сварки*

Плавящийся электрод для ручной дуговой сварки представляет собой стержень из сварочной проволоки, на который нанесено электродное покрытие (обмазка). Промышленность выпускает достаточно большое число марок сварочной проволоки диаметром от 1,6 до 12 мм для изготовления электродов. Длина электродов составляет 150...450 мм. Наиболее часто используют электроды длиной 350, 400 и 450 мм и диаметром 3,4 и 5 мм. Металл электрода и элементы электродного покрытия участвуют в формировании сварного шва.

Электродное покрытие.

- обеспечивает устойчивое горение дуги;
- восстанавливает окисляющийся в процессе сварки металл;

- легирует сварной шов необходимыми элементами;
- защищает зону сварки от попадания кислорода, водорода и азота из окружающего воздуха;
- образует шлаковый покров на поверхности сварного шва, уменьшая тем самым скорость охлаждения и затвердевания металла шва.

Для обеспечения высоких эксплуатационных характеристик сварного соединения необходимо, чтобы химический состав сварного шва был близок к химическому составу свариваемой стали.

Поэтому для сварки стали определенного химического состава рекомендуется подобрать электроды с необходимым содержанием соответствующих легирующих элементов в сварочной проволоке.

Условное обозначение марки проволоки состоит из индекса Св - сварочная и следующих за ним цифр, показывающих содержание углерода в сотых долях процента и буквенных обозначений элементов, входящих в состав проволоки. Буква А в конце обозначения указывает на повышенную чистоту металла по содержанию серы и фосфора.

Например Св-08ХМ для сварки конструкционных сталей содержит 0,08% углерода и менее 1 % хрома и молибдена. Св-04Х19Н11МЗ для сварки жаропрочных и коррозионностойких сталей содержит 0,04% углерода, 19% хрома, 11% никеля и 3% молибдена.

В состав покрытия входят:

- стабилизирующие вещества;
- раскислители и легирующие материалы;
- газообразующие материалы;
- шлакообразующие;
- • связующие и цементирующие.

Эти компоненты обеспечивают функции покрытия при его расплавлении в процессе сварки.

Стабилизирующие вещества предназначены для устойчивого горения дуги. К ним относятся соединения щелочных и щелочно-земельных металлов калия натрия, кальция и др.

Раскислители (ферромарганец, ферросилиций, ферротитан) применяют для восстановления окисленного в процессе сварки металла. Кроме того эти же ферросплавы служат легирующими материалами и увеличивают содержание марганца, титана и других элементов в металле шва.

Газообразующие материалы (мрамор, магнезит, крахмал, оксигеллюлоза, древесная мука) образуют защитный газ, защищающий зону сварки от попадания кислорода, водорода и азота из окружающего воздуха.

Шлакообразующие (полевой шпат, кремнезем, магнезит, мрамор) образуют шлаковый покров на поверхности расплавленного металла шва. Шлак уменьшает скорость охлаждения и затвердевания металла шва, способствует выходу из него газовых и оксидных включений. После остывания сварного соединения необходимо сколоть с него шлаковую корку.

Связующие и цементирующие (калиевое жидкое стекло  $K_2O \cdot SiO_2$ , на-

триевое жидкое стекло  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ ) связывают все компоненты покрытия.

Электродное покрытие образуется из хорошо размолотых и перемешанных материалов, связанных жидким стеклом. Его наносят на сварочную проволоку, предварительно нарезанную на куски длиной от 350 до 450 мм. На один из концов куска покрытие не наносят. Он служит для закрепления электродов при их сушке, а при сварке для помещения в электрододержателе.

В справочниках кроме марки сварочной проволоки указывают марку электродного покрытия, а также рекомендации по использованию электродов.

Стальные электроды для дуговой сварки классифицируют в соответствии с ГОСТ 9466-75 и ГОСТ 9467-75.

По назначению в зависимости от свариваемых материалов: У - для сварки углеродистых сталей;

- Л - легированных конструкционных сталей;
- Т - легированных теплоустойчивых сталей,
- В - высоколегированных сталей с особыми свойствами;
- Н - для наплавки поверхностных слоев.

По толщине покрытия

- М - тонкие покрытия  $D/d < 1,2$  ;
- С - средние покрытия  $1,2 < D/d < 1,45$ ;
- Д - толстые покрытия  $1,45 < D/d < 1,8$ ;
- Г - особо толстые покрытия  $D/d > 1,8$ .

D - диаметр электрода с покрытием, d - диаметр сварочной проволоки.

По виду покрытия:

- А - с кислым покрытием;
- Б - с основным покрытием;
- Ц - с целлюлозным покрытием;
- Р - с рутиловым покрытием;
- П - с прочими покрытиями.

Кроме того, электроды классифицируют по технологическим особенностям (сварка в различных положениях), по роду тока и полярности применяемого тока, а также по другим признакам. Полная маркировка электрода:

Э46А - УОНИ -13/45 - 4,0 - УД2                    ГОСТ 9466 - 75

Е432(5)-Б10

По ГОСТ 9467 - 75 это расшифровывается:

- Э - электроды для электродуговой сварки;
- 46 - минимальный гарантируемый предел прочности (460 МПа );
- УОНИ -13/45 - марка электродного покрытия;
- 4,0 - диаметр электрода;
- У - электроды для сварки углеродистой и низколегированной стали;
- Д2 - электроды с толстым покрытием второй группы точности;
- Е - индекс, характеризующий свойства металла сварного шва;
- 43 - предел прочности на разрыв (не менее 460 МПа );
- 2 - относительное удлинение не менее 22 %;

- 5 - индекс, характеризующий ударную вязкость металла - 34,3 Дж/см при температуре минус 40°C.

- Б - основное покрытие;
- 1 - сварка во всех пространственных положениях;
- 0 - на постоянном токе обратной полярности.

Полная маркировка не содержит сведений о марке сварочной проволоки, что вызывает необходимость повторного обращения к стандарту.

Обычно производители электродов используют сокращенную маркировку. Например марка электродного покрытия УОНИ -13/45, марка сварочной проволоки Св - 08.

#### *Разработка технологического процесса сварки резервуара*

Разработка технологического процесса сварки включает в себя:

- выбор типа сварного соединения;
- определение оптимального режима сварки;
- определение порядка наложения сварных швов;
- выбор сварочного оборудования.

#### *Сварные соединения.*

В промышленности используют достаточно много типов сварных соединений.

- стыковые;
- угловые;
- тавровые,
- нахлесточные

В табл. 2 приведены некоторые типы стыковых сварных соединений, а в табл. 3 - угловых.

В настоящей работе рассматриваются односторонние - У4, У6 и двухсторонние - У5, У7 угловые сварные соединения без разделки кромок и с разделкой одной кромки табл. 3).

Площадь поперечного сечения основного наружного шва определяют по формуле:

$$S_{осн} = \frac{A^2}{2} \cdot K_y, \text{ мм}^2 .$$

где  $K_y$  - коэффициент увеличения. Коэффициент увеличения выбирают по табл. 4 в зависимости от величины катета А. Коэффициент увеличения учитывает наличие зазора между свариваемыми деталями и выпуклость (полноту) шва.

$K_y$  выбирают по табл 4 в зависимости от величины катета С.

Площадь поперечного сечения внутреннего подварочного шва определяют аналогично

$$S_{вн} = \frac{C^2}{2} \cdot K_y, \text{ мм}^2 .$$

Таблица 2

Стыковые сварные соединения при ручной дуговой сварке (ГОСТ 5264 - 80)

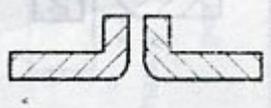
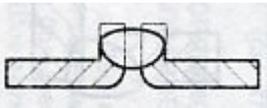
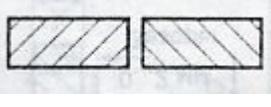
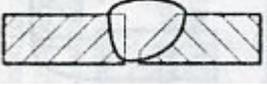
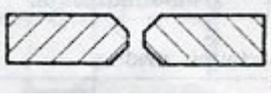
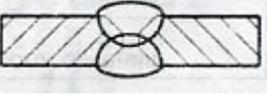
Форма подготовленных кромок	Характер сварного	Форма поперечного сечения		Толщина свариваемых	Условное обозначение со-
		подготовленных кромок	сварного соединения		
С отбортовкой кромок	Односторонний			1...4	C1
Без скоса кромок					C2
Со скосом одной кромки				3..60	C8
С двумя симметричными скосами кромок	Двухсторонний			8..120	C25

Таблица 3

Угловые сварные соединения при ручной дуговой сварке (ГОСТ 5264 - 80)

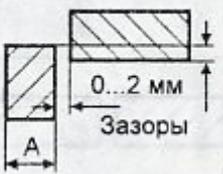
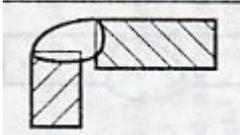
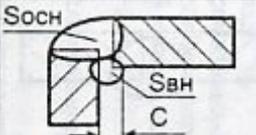
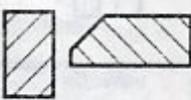
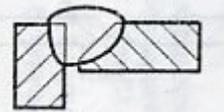
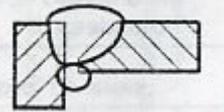
Форма подготовленных кромок	Характер сварного шва	Форма поперечного сечения		Толщина свариваемых деталей, мм	Условное обозначение соединения
		подготовленных кромок	сварного соединения		
Без скоса кромок	Односторонний			1...30	У4
	Двухсторонний			2...30	У5
Со скосом одной кромки	Односторонний			3...60	У6
	Двухсторонний				У7

Таблица 4

Коэффициент увеличения $K_u$				
Катет шва А или С, мм	2,5...3	3,5...4	4,5...5,5	5,5...6
Коэффициент увеличения, $K_u$	1,5	1,45	1,4	1,35

Общая площадь поперечного сечения сварного соединения:

$$S = S_{\text{осн}} + S_{\text{вн}}, \text{ мм}^2$$

Толщину свариваемых заготовок А (толщина стенок ванны) и величину катета подварочного шва С выбирают в соответствии с вариантом задания

*Порядок, последовательность и направление наложения швов*

Швы длиной до 250 мм можно варить напроход (рис. 10). Сварка напроход от середины к краям рекомендуется при длине шва 250...500 мм. При большей длине шва рекомендуется обратноступенчатая сварка. Шов выполняют короткими отрезками 1...4.

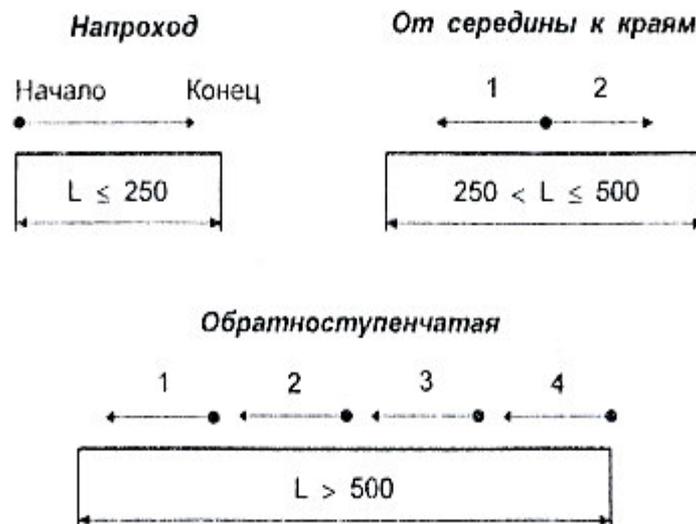


Рис. 1.10. Последовательность и направление наложения швов

Для уменьшения коробления свариваемой ванны необходимы определенный порядок и последовательность наложения сварных швов. Порядок наложения швов аналогичен во всех вариантах задания. Последовательность может быть разной.

В вариантах с двухсторонними сварными соединениями У5 и У7 листы сначала прихватывают короткими внутренними подварочными швами, расположенными на расстоянии до 250 мм один от другого. Затем проваривают внутренний подварочный шов полностью. Подварочными швами соединяют

все элементы ванны. После этого ванну переворачивают и выполняют основные наружные швы. В вариантах с односторонними сварными соединениями У4 и У6 внутренние швы не выполняют. Листы прихватывают снаружи. Затем полностью проваривают наружные швы

### *Режим сварки и выбор оборудования*

Режим сварки - совокупность характеристик сварочного процесса, обеспечивающих получение сварного шва заданного размера, формы и качества. При сварке открытой дугой такими характеристиками являются:

- марка и диаметр электрода;
- напряжение дуги;
- сила сварочного тока;
- род тока и полярность;
- скорость сварки.

При выборе марки электрода следует учитывать химический состав свариваемой стали и требования, предъявляемые к качеству сварного соединения. Марку сварочной проволоки и марку электродного покрытия выбирают по табл.5 в зависимости от марки свариваемой стали.

Диаметр электрода выбирают в зависимости от толщины свариваемого металла.

Силу сварочного тока определяют по формуле

$$I_{св} = I_{уд} \cdot d_{эл} \quad , A$$

где  $I_{уд}$  - удельный сварочный ток, приходящийся на 1 мм диаметра электрода, А/мм.

Меньшие значения силы тока используют при сварке легированных сталей, обладающих малым коэффициентом теплопроводности, с целью уменьшения перегрева. Большие значения удельного тока используют для определения силы тока при сварке низкоуглеродистых сталей.

## Электроды для сварки сталей

Марка		Коэффициент расхода электродов на 1 кг наплавленного металла к.	Коэффициент наплавки Кн,	Род тока	Полярность	Марка свариваемой стали	
марка электродного покрытия	марка сварочной проволоки						
АНО-4С MP-3	Св-08 или Св-08А	1,7	8,5	Постоянный	Любая	<i>Низкоуглеродистые</i> Ст4, Сталь 20	
				Переменный		С1, Сталь 15	
		1,6		Постоянный	Обратная	Ст3, Сталь 25	
				Переменный		Ст2, Сталь 10	
Э-138/50Н	Св-10ГН	1,7	9	Постоянный	Обратная	<i>Низколегированные</i> 12ГС, 15ГФ, 14Г2, 14ХГС	
ЦЛ-45	Св-08ХМ	1,65				15ХСНД.12Х1МФ, 15Х1М1Ф.10ХСНД	
ЭА-395/9	Св-10Х16Н2 5АМ6	1,6				11	<i>Легированные</i> 08Х12Н8К5М2Т, 08Х12Н7К7М4
ЭА-400/10У	Св-04Х19Н1 1М3	1,8				12	10Х17Н13М2Т, 08Х18Н10Т

*Выбор сварочного аппарата*

Вид сварочного аппарата определен в задании. Если в номере варианта есть буква П - используйте сварочный преобразователь, В - выпрямитель. При отсутствии буквы - трансформатор. Легированные стали рекомендуется сваривать только на постоянном токе (сварочный преобразователь, выпрямитель). Причем лучше использовать обратную полярность, чтобы не допустить перегрева и выгорания легирующих элементов. Выбирают сварочный аппарат, в диапазон регулирования которого попадает рассчитанное значение  $I_{св}$ .

Род тока и полярность выбирают в зависимости от физико - механических свойств свариваемой стали и используемой марки электрода. С целью упрощения выбора в табл. 6 подобраны и заданы род тока и полярность для конкретных марок сталей и электродов.

Низкоуглеродистые стали можно сваривать как на переменном токе, так и на постоянном. Сварка на постоянном токе и тем более с использованием обратной полярности позволяет повысить качество сварного соединения.

Рабочее напряжение дуги определяется ее длиной и колеблется в пределах  $U_d = 20...40 В$ .

Масса наплавленного металла основных наружных швов:

$$G_H^{осн} = \frac{S_{осн}}{1000} \cdot L_{осн} \cdot \rho, \text{ г}$$

где  $S_{осн}$  - площадь поперечного сечения основного наружного шва,  $\text{мм}^2$ ;  $L_{осн}$  - суммарная длина основных сварных швов, мм;  $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$  - плотность наплавленного металла.

Массу наплавленного металла подварочных швов находят аналогично.

Общая масса наплавленного металла сварных соединений при соединении элементов металлической ванны:

$$G_H = G_H^{осн} + G_H^{вн}, \text{ г}$$

Расход электродов на изготовление металлической ванны:

$$G_{эл} = k \cdot G_H, \text{ г}$$

где  $k = 1,6 \dots 1,8$  - коэффициент расхода электродов на 1 кг наплавленного металла. В табл. 5 заданы конкретные значения  $k$ . Коэффициент расхода  $k$  учитывает: массу электродного покрытия; потери металла на угар, разбрызгивание и огарки.

Время, необходимое для выполнения сварочных работ

$$T_{св} = T_{осн} + T_{обсл} + T_{под} + T_{отд}, \text{ ч}$$

где  $T_{осн}$  - основное технологическое время, ч;

$T_{обсл}$  - время, затрачиваемое на обслуживание оборудования, ч;

$T_{под}$  - подготовительное время на получение электродов, инструмента и др., ч;  $T_{отд}$  - время, затрачиваемое на отдых, ч.

Основное технологическое время рассчитывают используя формулу:

$$T_{осн} = \frac{G_H}{K_H \cdot I_{св}},$$

где  $G_H$  - масса наплавленного металла;  $K_H$  - коэффициент наплавки,  $\text{г}/(\text{А} \cdot \text{ч})$ ;  $I_{св}$  - сила сварочного тока, А.

Коэффициент наплавки  $K_H [ \text{г}/(\text{А} \cdot \text{ч}) ]$  - масса наплавленного на поверхность детали металла в граммах за 1 час, приходящаяся на силу тока в 1 ампер. В табл. 5 даны величины коэффициента наплавки для различных марок электродов.

Окончательно время, необходимое для выполнения сварочных работ при наложении внутреннего и основного швов:

$$T_{св} = \frac{T_{осн}}{K_{исп}}, \text{ ч}$$

где  $K_{исп}$  - коэффициент использования сварочного поста.

Коэффициент использования сварочного поста  $K_{исп}$  учитывает время на обслуживание оборудования, на получение материалов, на отдых и др. Значения коэффициента использования  $K_{исп} = 0,5..0,8$ .

Производительность сварки:

$$G = K_H \cdot I_{св} , \text{ г/ч.}$$

Скорость сварки при формировании основного шва:

$$v_{св}^{осн} = \frac{K_H \cdot I_{св}}{\rho \cdot S_{осн}} , \text{ м/ч.}$$

Скорость сварки при формировании внутреннего шва:

$$v_{св}^{вн} = \frac{K_H \cdot I_{св}}{\rho \cdot S_{вн}} , \text{ м/ч .}$$

Расход электроэнергии рассчитывают, используя формулу:

$$Q = 0,001 \cdot U_d \cdot I_{св} \cdot T_{осн} ,$$

где  $U_d$  - рабочее напряжение дуги, В;

$I_{св}$  - сила сварочного тока, А;

$T_{осн}$  - основное технологическое время сварки, ч.

*Порядок снятия внешней вольтамперной характеристики сварочного трансформатора.*

Порядок снятия и построения графической зависимости напряжения на клеммах источника от тока нагрузки следующий:

- закрепить электрод в электрододержателе;
- снять три зависимости напряжения на клеммах источника от тока нагрузки в соответствии с условиями, приведенными в журнале.
- По результатам эксперимента строят три графика внешней вольт-амперной характеристики.

*Порядок выполнения работы*

1. Получить задание от преподавателя.
2. Изучить сварочное оборудование и основные схемы сварки.
3. С учебным мастером провести эксперимент по снятию вольтамперной характеристики сварочного трансформатора. Проведение отдельных опытов может быть поручено студентам знакомым с ручной дуговой сваркой.

4. Пользуясь примером оформления отчета выполнить необходимые эскизы, выбрать сварочный аппарат, электроды и рассчитать рациональный режим сварки ванны в соответствии с вариантом задания.

5. Сдать практическую работу преподавателю. Отчет должен быть выполнен в рабочей тетради ручкой. Эскизы - в карандаше.

### *Контрольные вопросы*

1. Преимущества и недостатки сварки постоянным, переменным и выпрямленным током.
2. Схемы сварки постоянным, переменным и выпрямленным током.
3. Устройство сварочного трансформатора.
4. Марки сварочных электродов и их назначение.
5. Назначение и состав электродных покрытий.  
Как расшифровать состав свариваемой стали и сварочной проволоки.
6. Маркировка химических элементов.  
Крутопадающая и пологопадающая внешняя вольтамперная характеристика источника тока.
7. Порядок снятия вольтамперной характеристики трансформатора. Как получить режимы  $I_{кз}$ ,  $U_{хх}$ ,  $I_{кор}$  и  $I_{дл}$ .
10. Зона рабочих токов  $I_d$  и зона рабочих напряжений дуги  $U_d$ .
11. Угловые сварные соединения.
12. Основные и подварочные швы.
13. Порядок наложения сварочных швов.
14. Последовательность определения режима сварки.
15. Выбор диаметров электродов для наложения основного и подварочного швов.
16. Сила тока, приходящаяся на 1 мм диаметра электрода
17. Определение продолжительности сварки.
18. Определение массы наплавленного металла и расхода сварочных электродов.

## Лабораторная работа 2

*Влияния силы сварочного тока на величину коэффициента наплавки при восстановлении деталей машин*

Цель работы – закрепить теоретические знания, полученные на лекции, получить навыки использования лабораторного оборудования и контрольно-измерительных приборов, исследовать коэффициенты расплавления и наплавки при дуговой сварке, определить коэффициент потерь металла

Применяемое оборудование: сварочный трансформатор, электрододержатель, весы электрические, масштабная линейка и микрометр::

Основы теории тепловых процессов сварочной дуги

Электроды или сварочная проволока при различных способах дуговой сварки плавлением нагреваются от двух источников тепловой энергии: сварочной дуги и тепла, которое выделяется при протекании тока по вылету электрода (по закону Джоуля - Ленца).

Температура столба дуги по данным многих исследований составляет 5500-7500 К. При сварке постоянным током температура в катодной области ниже температуры в анодной, так как часть тепловой энергии затрачивается на эмиссию электронов. Анод получает от столба дуги дополнительную энергию с потоком электронов. Температура на анодном и катодном пятнах приближается к температуре испарения металла. Тепловая энергия, выделяющаяся на катодном и анодном пятнах, расходуется на нагрев и плавление электрода (сварочной проволоки) и свариваемого металла. Часть тепловой энергии расходуется на термоэмиссию электронов. Тепловая энергия сварочной дуги:

$$Q = IU, \text{ Дж/ч,}$$

где  $I$  - сила сварочного тока, А;  $U$  - напряжение дуги, В.

Часть тепловой энергии сварочной дуги расходуется на теплоотдачу в окружающую среду, на потери при разбрызгивание металла и др.

Эффективная энергия сварочной дуги, характеризующая количество тепловой энергии, вводимой сварочной дугой в металл, составляет

$$Q_{\text{эфф}} = \eta IU,$$

где  $\eta$  - эффективный коэффициент использования тепловой энергии сварочной дуги.

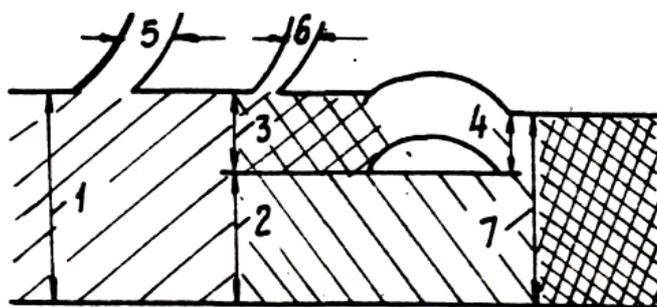


Рис. 2. 1. Тепловой баланс сварочной дуги: 1 – полная тепловая энергия (100%); 2 - энергия, поглощаемая свариваемым металлом (50%); 3 - энергия, поглощаемая электродом (30%); 4 - энергия, переносимая в сварочную ванну с каплями расплавленного металла (25%); 5 - энергия, рассеиваемая в окружающую среду (20%); 6 - энергия, теряемая с каплями разбрызгиваемого металла (5%); 7 - эффективная тепловая энергия (75%).

Величина  $\eta$  зависит от способа сварки (рис. .1), материала электрода, состава покрытия и других факторов. При сварке открытой дугой электродами с толстым покрытием  $\eta=0,70...0,75$ , при сварке под слоем флюса  $\eta = 0,85...0,90$ .

Количество тепловой энергии, выделяемой на длине вылета электрода (рис.2.2.), по закону Джоуля - Ленца равно:

$$Q_e = I^2 \cdot \frac{\rho \cdot l_e}{F}, \text{ Дж/ч,}$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление металла проволоки. Ом·м;  $l_e$  - длина вылета не более 0,42...0,43 м;  $F$  - площадь сечения сварочной проволоки, м<sup>2</sup>.

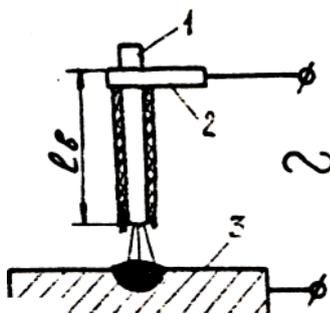


Рис.. 2.2.. Вылет электрода при ручной дуговой сварке 1 – электрод; 2 – электрододержатель; 3 – свариваемый металл

При соблюдении оптимальных режимов сварки сварочная проволока по длине вылета нагревается до 870 К (600°C). Такая температура способствует ускорению процесса плавления электрода. При большей плотности сварочного тока электрод нагревается более 900 К, при этом ухудшается формирование шва и увеличивается разбрызгивание металла, обмазка отстает от поверхности электрода. Поэтому при ручной дуговой сварке величину тока ограничивают.

Производительность процесса сварки определяется количеством расплавленного и наплавленного металла в единицу времени.

Масса расплавленного металла электрода или сварочной проволоки опре-

деляется по формуле:

$$G_p = K_p \cdot I \cdot t,$$

где  $K_p$  - коэффициент расплавления,

Коэффициент  $K_p$  показывает массу расплавленного металла электрода при токе 1 А в течение часа. Коэффициент расплавления зависит от величины тока (плотности тока), напряжения дуги, состава и толщины электродного покрытия и др.

С увеличением сварочного тока увеличивается его эффективная тепловая энергия  $Q_{эфф}$  и, следовательно, повышается количество тепла, вводимого в металл электрода. Кроме того, увеличивается температура нагрева электрода проходящим током. Однако часть расплавленного металла электрода испаряется и разбрызгивается. Масса металла, наплавляемого на поверхность свариваемой детали, будет равна:

$$G = K_n \cdot I \cdot t,$$

где  $K_n$  - коэффициент наплавки, г/А·ч.

Коэффициент наплавки характеризует массу наплавленного на поверхность детали металла при токе 1А в течение часа:

$$K_n = \frac{G_n}{I \cdot t},$$

Коэффициент наплавки  $K_n$  меньше коэффициента расплавления на величину потерь. Коэффициент потерь:

$$K_n = \frac{G_p - G_n}{G_p} \cdot 100\% ,$$

или

$$K_n = \frac{K_p - K_n}{K_p} \cdot 100\% ,$$

Коэффициент потерь может изменяться в зависимости от способа сварки, типа электрода и плотности тока.

На величину потерь металла оказывает влияние: род и сила сварочного тока; напряжение на дуге; химические составы стержня и покрытия электрода; длина сварочной дуги; характер переноса капель металла от электрода в сварочную ванну и величина наклона электрода в процессе сварки.

Так, при сварке электродами с тонким покрытием потери металла сварочной проволоки составляют 10 - 15%, при использовании электродов с толстым покрытием – 10%, а при автоматической сварке под слоем флюса - не более 5%.

При ручной дуговой сварке электродами с тонким покрытием  $K_n = 5,5...6,5$  г/А·ч. При использовании электродов с толстым покрытием  $K_n$  состав-

ляет 8...10 г/А·ч.

При дуговой сварке капля, оторвавшаяся от электрода в процессе переноса от катода к аноду продолжительностью 0,01...0,05 с, в зависимости от плотности сварочного тока нагревается до температуры более 2500 К. При такой температуре наблюдается испарение металла.

Многими исследованиями установлено, что основной причиной потерь металла при ручной дуговой сварке является разбрызгивание. Интенсивность разбрызгивания металла в значительной степени определяется характером переноса металла от электрода в сварочную ванну.

Скоростными киносъемками установлено три характера переноса металла: крупными каплями, мелкими каплями и струйный.

Характер переноса капель от электрода в сварочную ванну, зависит от напряжения на дуге, силы сварочного тока и длины сварочной дуги.

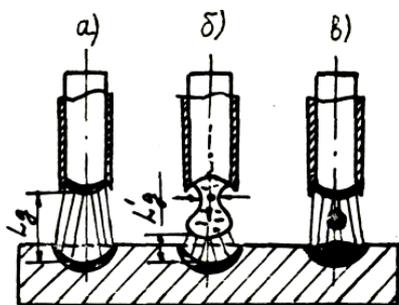


Рис..2. 3. Схема переноса металла через сварочную дугу:

а - струйный; б - крупными каплями; в - мелкими каплями

При использовании электродов диаметром до 2,0 мм сварку производят при малых плотностях тока (10...15 А/мм<sup>2</sup>) короткой дугой (рис . 3). Напряжение на дуге не превышает 22 В.

Капли электродного металла крупных размеров переходят в ванну при минимальной длине дуги или коротких замыканиях.

В результате действия эффективной энергии сварочной дуги на торце электрода образуется капля жидкого металла, которая удерживается силами поверхностного натяжения. По мере увеличения размеров капли, в результате действия силы тяжести

и электромагнитных сил, в капле образуется узкая перемычка. Вследствие уменьшения длины дуги падает напряжение на дуге и повышается величина силы сварочного тока. При увеличении плотности тока металл в зоне перемычки нагревается до температуры кипения. Ввиду реактивного действия паров металла происходит взрывообразный отрыв капли от электрода. Образовавшиеся при взрыве очень мелкие капли металла отбрасываются за пределы дугового промежутка.

Сварка электродами диаметром более 2,0 мм производится на длинной дуге при плотности тока более 15 А/мм<sup>2</sup>. С увеличением тока размеры капель уменьшаются (см. рис.. 3). При сварке длинной дугой и высокой плотности тока увеличивается количество взрывообразно отрываемых от электрода капель в единицу времени. Поэтому возрастает разбрызгивание мелких капель металла.

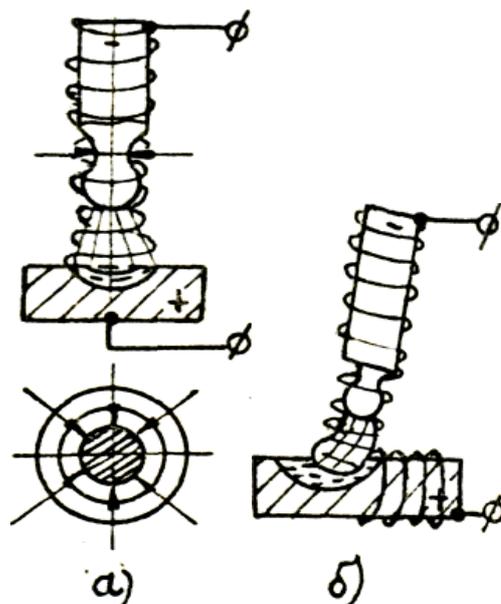


Рис..2. 4. Образование поперечного магнитного поля вокруг проводника, подключенного к источнику тока: а - ток подключен к центру металла; б - ток подключен сбоку металла

При больших плотностях тока возможен струйный перенос расплавленного металла от электрода в сварочную ванну.

Участие электромагнитных сил в формировании перемычки в капле объясняется образованием магнитного поля вокруг проводника, подключенного к источнику тока (рис.4). Столб сварочной дуги можно рассматривать как гибкий проводник, по которому проходит электрический ток.

Напряженность магнитного поля зависит от силы сварочного тока:

$$H = k \cdot I, \text{ А/м,}$$

где  $K$  - коэффициент пропорциональности.

В практических расчетах напряженность магнитного поля, образующегося вокруг электрода, принимают равным квадрату тока.

Под воздействием поперечного магнитного поля возникают электромагнитные силы, действующие на каплю электродного металла и ее перемычку (см. рис. 3 и 4).

В покрытиях электродов содержатся газообразующие вещества: мрамор, органические компоненты и др. От тепловой энергии сварочной дуги и нагретого металлического стержня электрода материал покрытия начинает плавиться и испаряться изнутри. Так как покрытие плавится с некоторым опозданием по сравнению с металлическим стержнем, на торце электрода образуется козырек (рис. 5).

Поэтому газовый поток направляется к сварочной ванне. В дуговом промежутке образуется интенсивное газовое дутье. Поток газа отдельные частицы жидкого металла отбрасывают за пределы сварочной ванны. Такие потери металла увеличиваются по мере увеличения плотности тока и при мелкокапельном переносе металла

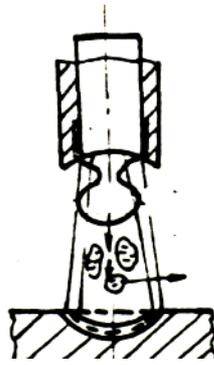


Рис. 2.5. Схема действия газового потока на капли жидкого металла в дуговом промежутке

Образование газовой среды в дуговом промежутке объясняется следующими причинами.

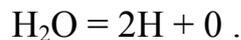
При высокой температуре наблюдается диссоциация карбидов мрамора, входящего в состав электродного покрытия;



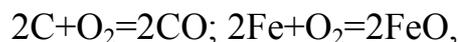
Затем в результате диссоциации углекислого газа образуется окись углерода и кислород



При содержании влаги в электродном покрытии возможна диссоциация  $\text{H}_2\text{O}$  по схеме



В дуговом промежутке образуется окислительная газовая среда сложного химического состава, включающая  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_2$  пары металлов. Создаются благоприятные условия для адсорбции газов в капле жидкого металла и для окисления  $\text{C}$  и  $\text{Fe}$  в капле жидкого металла:



Объем образовавшейся газообразной окиси углекислого газа во много раз превышает объем капли; образовавшийся газ, разрушая каплю с большой скоростью, выделяется в дуговом промежутке. Некоторые частицы разрушенной капли металла вылетают за пределы сварочной ванны (см. рис. 5).

Следовательно, величина потерь металла зависит от плотности сварочного тока, оказывающего влияние на характер переноса капли, интенсивность газового потока и окислительные процессы в капле жидкого металла. При сварке постоянным током потери будут больше, чем при использовании переменного тока.

### Порядок выполнения работы

Исследовать влияние силы переменного сварочного тока на величину коэффициента наплавки при использовании электродов с толстым покрытием. Силу тока определяют из условия  $I = (40...50)d_{эл}$ , А.

Во время наплавки электродного металла на стальную пластинку фиксируют ток и время непрерывного горения дуги в секундах.

Перед опытом пластину очищают металлической щеткой и взвешивают. После наплавки валика пластину очищают от брызг металла и шлака и вторично взвешивают. По разности результатов взвешивания пластины определяют массу наплавленного металла.

Коэффициент наплавки определяют по формуле:

$$K_n = \frac{G_{п.н.} - G_{д.н.}}{I \cdot t},$$

где  $G_{п.н.}$  - масса пластины с наплавленным валиком, г;

$G_{д.н.}$  - масса пластины до наплавления валика, г;

$t$  – время горения дуги при наплавке валика, с.

Массу расплавленного электродного металла в граммах определяют по формуле

$$G_p = \frac{\pi d_{эл}^2}{4} (l_{э.д.н.} - l_{э.п.н.}) \cdot \rho,$$

где  $d_{эл}$  - диаметр электродного стержня, см;

$l_{э.д.н.}$  - длина электрода до наплавки, см;

$l_{э.п.н.}$  - длина электрода после наплавки, см;

$\rho$  - плотность стального электрода (7,8) г/см<sup>3</sup>.

Результаты исследований вносят в журнал лабораторных работ.

### Контрольные вопросы

1. Эффективная тепловая мощность сварочной дуги.
2. Определение количества тепла, выделяемого на длине вылета электрода.
3. Определение производительности сварки.
4. Понятие о коэффициентах расплавления и наплавки.
5. Объясните характер и причины изменения коэффициента наплавки по мере увеличения силы сварочного тока.
6. Причины разбрызгивания металла при электрической дуговой сварке.

### Лабораторная работа № 3

#### *Распределение температуры, напряжений и деформаций, возникающих в металле при восстановлении деталей дуговой сваркой*

Цель работы: закрепить теоретические знания, полученные на лекциях; получить навыки использования лабораторного оборудования и контрольно-измерительных приборов; Получить навыки по планированию, организации и проведению исследований; изучить характер распределения температуры в металле при дуговой сварке; изучить причины неравномерного распределения температуры в металле в зоне термического влияния; исследовать характер распределения температуры в зоне термического влияния и деформацию металлов в процессе сварки.

Применяемое оборудование: сварочный трансформатор, электрододержатель, выпрямитель ВС-244, блок питания, усилитель ВИ6-5МА, датчик индуктивный ДП-2, усилитель напряжения, милливольтметр, потенциометр, термопары и секундомер.

#### Основы теории нагрева металла при сварке

При дуговой сварке тепловая энергия сварочной дуги вводится в металл сосредоточенно, и в результате плавления металла образуется анодное нагретое пятно (рис.1). В металле, прилегающем к сварочному валику, температура распределяется неравномерно.

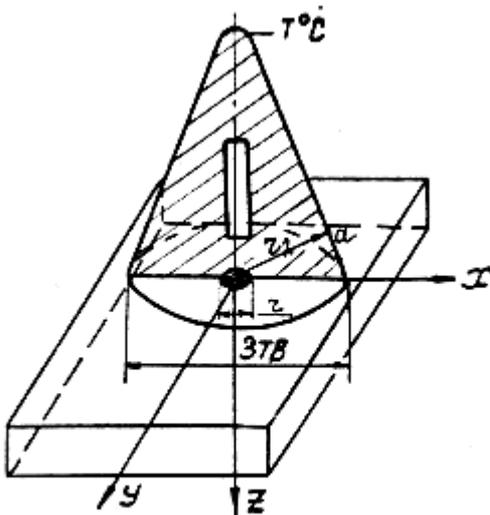


Рис. 3.1. Характер распределения тепла в металле при нагреве сосредоточенным источником тепла ( $\Delta x_0 = 0$ )

Участок металла, который подвергается неравномерному нагреву, называется зоной термического влияния. Величина зоны термического влияния и процессы распределения тепла в металле этой зоны зависят от следующих основных факторов: размеров и формы свариваемых деталей; теплофизических свойств металлов; эффективной тепловой энергии сварочной дуги, погонной энергии

дуги и др.

Эффективная тепловая энергия сварочной дуги определяет количество тепла, введенного дугой в свариваемый металл в единицу времени:

$$Q_{эфф} = \eta \cdot I \cdot U$$

где  $I$  - сила сварочного тока, А;  $U$  напряжение дуги, В;  $\eta$  - коэффициент использования тепловой энергии сварочной дуги.

Коэффициент  $\eta$  учитывает потери тепла на теплоизлучение, разбрызгивание капель расплавленного металла и др. При ручной дуговой сварке электродом с тонким покрытием  $\eta = 0,65$ ; при сварке электродом с толстым покрытием  $\eta = 0,70 \dots 0,75$ .

Количество тепла, вводимое в металл сварочной дугой в единицу длины шва, называется погонной энергией. Следовательно, погонная энергия представляет собой отношение эффективной энергии дуги, расходуемой на нагрев металла, к скорости перемещения дуги (к скорости сварки):

$$Q_{\text{поз}} = \frac{Q_{\text{эфф}}}{v_{\text{св}}}, \text{ Дж/м,}$$

где  $v_{\text{св}}$  - скорость сварки, м/ч.

Характер распределения температура в металле при  $v_{\text{св}} = 0$  (см. рис.1) описывается уравнением

$$T = \frac{Q_{\text{эфф}}}{2\pi \cdot \lambda \cdot r_2},$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Дж/м с °С;  $r_2$ —координаты точки ( $r_2 \geq r$ ), м;  $r$  - радиус анодного пятна нагрева, м.

Из формулы видно, что характер изменения температуры металла в зоне

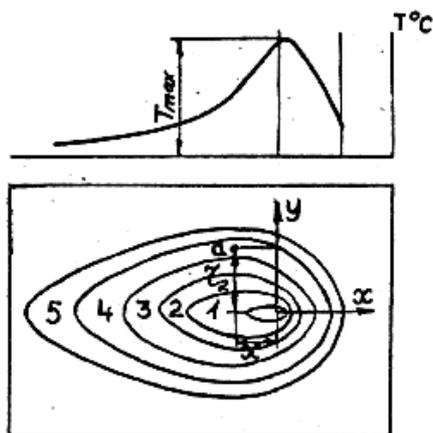


Рис. 3.2. Изотермы распределения температуры на поверхности низкоуглеродистой стали при дуговой сварке: 1 - 800°С; 2 - 600°С; 3 - 400°С; 4 - 400°С; 5 - 100°С.

25

термического влияния в зависимости от расстояния  $r_2$  от центра пятна нагрева представляет гиперболу: температура в точке  $a$  (см. рис.1) прямо пропорциональна эффективной энергии и обратно пропорциональна расстоянию от центра пятна нагрева до точки, в которой измеряется температура. По мере удаления от пятна нагрева, когда значение  $r_2$  увеличивается, температура уменьшается.

При действии на металл подвижного источника тока (электрод перемещается вдоль координатной оси  $X$ ) характер распределения температуры изменяется. Изотермы (рис. .2) будут вытягиваться и перемещаться в направлении движения сварочной дуги. Характер распределения температуры имеет зависимость:

$$T = \frac{Q_{\text{эфф}}}{2\pi \cdot \lambda \cdot r_2} \cdot \exp\left[\frac{v}{2a}(x + r_2)\right],$$

где  $a$  - коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

$$a = \frac{\lambda}{C \cdot \rho}$$

где  $C$  - теплоемкость свариваемого металла, Дж/с °С;  $\rho$  - плотность металла, 7,8 г/см<sup>3</sup>.

Изменение режима сварки оказывает влияние на форму изотермы, а, следовательно, и на распределение температуры в металле. С увеличением скорости сварки  $v_{\text{св}}$ , при постоянной эффективной тепловой энергии ( $Q_{\text{эфф}} = \text{const}$ ), изотермы суживаются в направлении движения электрода и концентрируются спереди дуги. Увеличение эффективной тепловой энергии при постоянной скорости сварки ( $v_{\text{св}} = \text{const}$ )

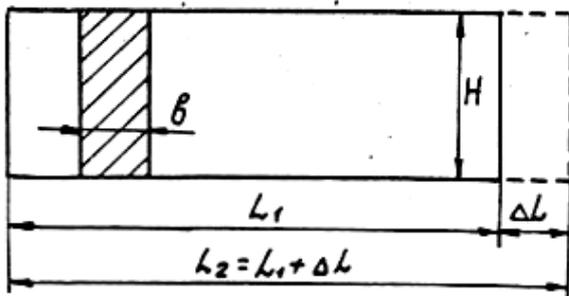


Рис. 3.3. Изменение размеров пластины при равномерном нагреве

приводит к развитию области нагрева металла, изотермы по ширине и длине увеличиваются.

Известно, что при нагревании изменяются физико-механические свойства металлов. Например, в интервале температур 350...800°С предел прочности углеродистой стали понижается, а относительное удлинение повышается; пластичность стали повышается, а механическая прочность понижается.

При равномерном нагреве пластина из малоуглеродистой стали будет постоянно удлиняться (рис.3). Величина свободного удлинения пластины зависит от температуры нагрева и равняется:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_1 \cdot T,$$

где  $\alpha$  - термический коэффициент расширения (для малоуглеродистой стали  $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$ );  $L$  - длина исходного образца при  $T = 20^\circ\text{C}$ , м.

Наибольшее удлинение пластина получит в момент достижения наивысшей температуры нагрева. По мере охлаждения, после нагрева, длина пластины будет постоянно уменьшаться до исходной величины.

В результате неравномерного нагрева в свариваемом металле возникают термические внутренние напряжения. Если величина внутренних напряжений  $\sigma$  превышает предел пропорциональности  $\sigma_{\text{пц}}$  металла, то в нем возникают пластические деформации. В случае, когда величина внутренних напряжений превышает предел прочности  $\sigma_{\text{в}}$  в металле, могут образоваться микротрещины.

Процесс деформации металла рассмотрен на примере наплавки валика на кромку стальной пластины (рис.4. поз.1). В процессе наплавки валика на кромку пластины металл в зоне термического влияния нагревается больше по сравнению с участками, удаленными от верхней кромки образца. Участки, прилегающие к наплавленному валику, подвергаются линейному расширению. Этому процессу оказывают сопротивление нижние, менее нагретые, слои металла. В результате того, что в верхних слоях зоны термического влияния пластины возникают напряжения растяжения, а в нижних его слоях - напряжения сжатия, пластина подвергается деформации (рис..4.поз.2).

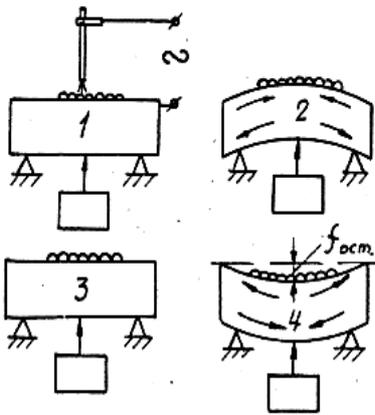


Рис. 3.4. Схема деформации стальной пластины.

По мере охлаждения пластины после наплавки валика внутренние напряжения в металле выравниваются и пластина постепенно выпрямляется (рис. .4, поз.3). При дальнейшем охлаждении пластины в удаленных от наплавленного валика слоях металла образуется напряжение сжатия, вызывающее остаточную деформацию пластины в противоположном направлении (рис. .4, поз.4).

Величина остаточной деформации пластины из стали зависит от ее размеров, начальной температуры, режима сварки и погонной энергии. По мере повышения силы тока при постоянной скорости сварки величина деформации (стрелы прогиба) металла увеличивается (рис. .5). При постоянном значении силы тока и изменении скорости сварки (изменении погонной энергии) характер деформации стальной пластины изменяется. По мере уменьшения погонной энергии деформация пластины уменьшается (рис.3.6).

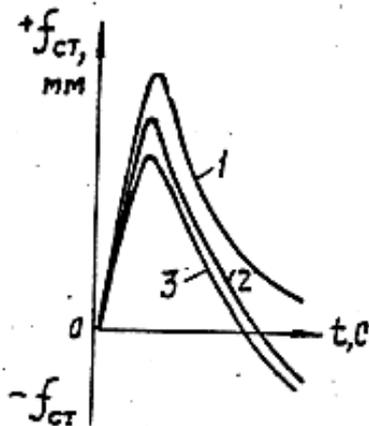


Рис 3.5. Характер изменения стрелы прогиба стальной пластины при изменении силы сварочного тока ( $U_{св} = const$ ).  $I = 150$  А;  $I = 140$  А;  $I = 130$  А

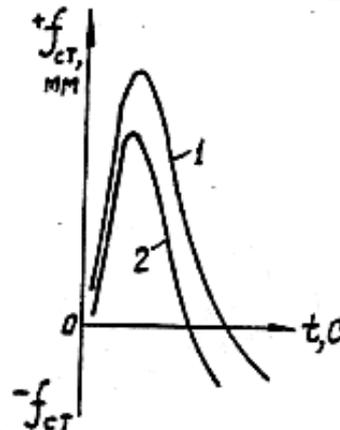


Рис 3.6. Характер изменения стрелы прогиба стальной пластины при изменении скорости сварки ( $I = const$ ).  $U_{св} = 7,2$  м/ч;  $U_{св} = 13,6$  м/ч

Повышение погонной энергии до определенного значения вызывает увеличение деформации пластины. При дальнейшем повышении  $Q_{пог}$  стрела прогиба образца уменьшается. Это объясняется тем, что при определенном значении  $Q_{пог}$  интенсивность ввода тепла в металл превышает интенсивность его отвода в ненагретую часть пластины. Затем наступает момент, когда обеспечива-

ется более равномерный нагрев всей пластины, и поэтому уменьшается степень ее деформации

### Порядок выполнения работы

Для выполнения лабораторной работы используется сварочный трансформатор. Наплавка валика длиной 150 мм на стальную пластину (рис. .7) производится электродом диаметром 3 ... 4 мм.

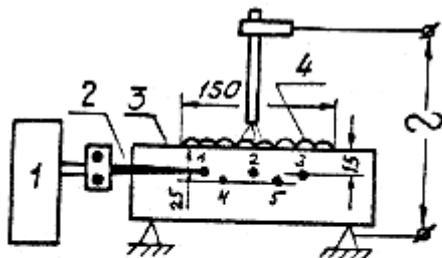


Схема 3.7. Схема установки для исследования распределения температуры при наплавке валика на стальную пластину: 1 - потенциометр; 2 - термопара; 3 - пластина; 4 - наплавленный валик

режима наплавки валика используется специальная установка (рис. .8), Индуктивный датчик установки фиксирует величину прогиба стальной пластины; сигналы датчика после усиления поступают в милливольтметр.

При установке и регулировании положения опытной пластины фиксируется положение стрелки милливольтметра. В процессе наплавки, пользуясь секундомером, определяют продолжительность сварки. Через установленные промежутки времени фиксируют абсолютные показания милливольтметра и записывают в журнал.

Исследовать распределение температуры в стальной пластине. Для исследования распределения температуры в зоне термического влияния в результате наплавки валика на пластину в отверстия ее боковой поверхности (см. рис. .7) поочередно вставляют хромель-алюмелевую термопару. Сигналы термопары фиксируются милливольтметром. При определении температуры нагрева металла учитывают, что 22,4 деления на шкале прибора соответствует  $100^{\circ}\text{C}$ . Измерения температуры начинают после наплавки валика, а затем через каждую минуту в пяти точках пластины.

Опытные данные, полученные при исследовании деформации опытной

В процессе экспериментальной части работы исследуется влияние режима наплавки на кинетику изменения стрелы прогиба пластины и распределение температуры в зоне термического влияния.

Для исследования характера деформации стальной пластины от принятого

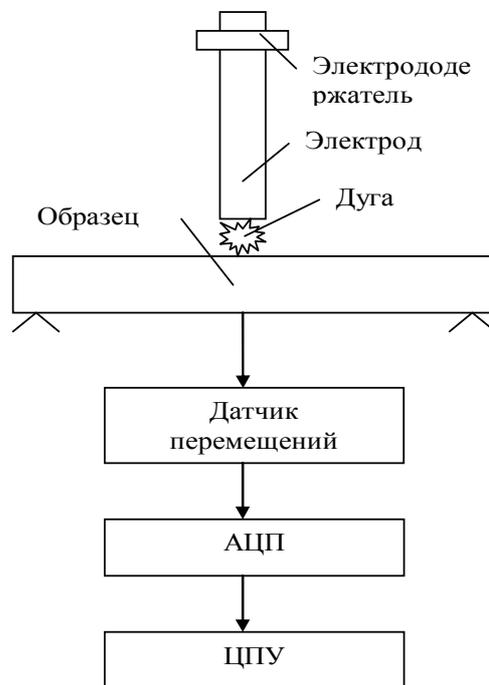


Рис. 3.8. Блок-схема экспериментальной установки

пластины  $f = f(I, t)$  при  $v_{ce} = const$ ,  $f = f(v_{ce}, t)$  при  $I = const$  обрабатывают в следующей последовательности:

- определяют средние арифметические значения стрелы прогиба образца

$$\bar{f} = \frac{\sum_{i=1}^N f_i}{N},$$

- проверяют точность проведения опытов по значению дисперсии:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})^2}{N - 1},$$

(опыты считаются корректными, если величина дисперсия не превышает  $5 \text{ мм}^2$ );

- строят графики (см. рис. .5 и .6) зависимостей  $f = f(I, t)$  при  $v_{ce} = const$ ,  $f = f(v_{ce}, t)$  при  $I = const$ .

Полученные результаты вносятся в журнал лабораторных работ.

### *Контрольные вопросы*

1. Факторы, влияющие на величину зоны термического влияния и процессы распределения тепла в металле при дуговой сварке.
2. Понятие об эффективной тепловой и погонной энергии.
3. Причины образования термических напряжений и деформации металла в процессе сварки.
4. По опытным данным объяснить влияние режима сварки на характер деформации металла по времени.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Выполнив данные лабораторные работы, студент ознакомился с возможными вариантами восстановительных технологий, усвоил принципы восстановительных операций изделий машиностроения; научился разрабатывать технологический процесс восстановления и повышения износостойкости деталей, а именно, четко и последовательно назначать восстановительные операции, выбирать необходимое оборудование, правильно указывать режимы, овладел навыками верификации данных стандартных испытаний по определению физико-механических свойств и технологических показателей используемых материалов и готовых изделий.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 .Технология конструкционных материалов /Под ред. А.А. Дальского. - М.: Машиностроение, 1985. -440с.
- 2 .Петров Г.Л., Туманов А.С. Теория сварочных процессов. М.: Высшая школа; 1977.-380с.
- 3 .Алов А.А. Основы теории процессов сварки и пайки. -41.: Машиностроение, 1964.-140с.

### Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Лабораторная работа 1 .....	<u>3</u>
Лабораторная работа 2 .....	25
Лабораторная работа № 3 .....	32
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	37
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	38

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ  
для студентов направления подготовки 15.03.01  
«Машиностроение», профиля «Технологии, оборудование, автоматизация ма-  
шиностроительных производств»  
всех форм обучения

Составители

Жачкин Сергей Юрьевич  
Краснова Марина Николаевна

Издается в авторской редакции

Подписано к изданию 06. 04. 2021.

Уч.-изд. л. 2,4.

ФГБОУ ВО "Воронежский государственный  
технический университет"

394026 Воронеж, Московский просп., 14