

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 практических работ для студентов  
направления 15.03.01 «Машиностроение»  
(профиль «Технология, оборудование и автоматизация  
машиностроительных производств»)  
всех форм обучения

Воронеж 2022

УДК 621.01 (07)  
ББК 34.5я7

Составитель  
д-р техн. наук, профессор С. Ю. Жачкин

**Физические основы восстановления деталей машин:** методические указания к выполнению практических работ для студентов направления 15.03.01 «Машиностроение» (профиль «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств») всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. С. Ю. Жачкин. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022. – 26 с.

В методических указаниях изложены требования и общие вопросы по выполнению практических работ, рассматриваются вопросы обеспечения качества и автоматизации процессов при восстановлении технических объектов, приводятся алгоритмы расчётов.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле МУ.ПР.ФОВДМ. pdf.

Ил. 11. Табл. 9. Библиогр.: 4 назв.

**УДК 621.01(07)**  
**ББК 34.5 я7**

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

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

# 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Плавящиеся и неплавящиеся электроды, тепловая энергия сварочной дуги, источники нагрева электрода

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 плавающимся (металлическим) электродом или с использованием неплавящегося (угольного или вольфрамового) электрода.

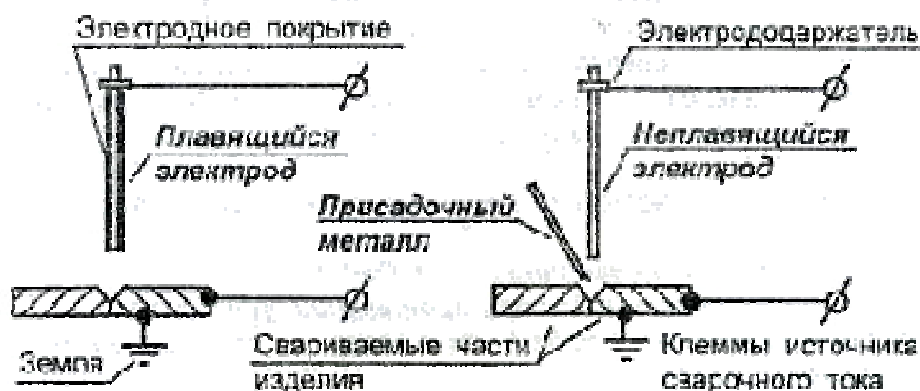


Рис. 1. Сварка плавающимся и неплавающимся электродом

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. Плавающий 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

$$Q_n = I \cdot U \cdot \tau, \quad (1)$$

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

$$Q_{эфф} = \eta \cdot I \cdot U \cdot \tau, \quad (2)$$

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

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \tau, \text{ Дж}, \quad (3)$$

где  $R$  - сопротивление вылета электрода, Ом. Сопротивление вылета электрода  $R = \frac{\rho \cdot l}{S} \cdot 10$ , Ом,

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

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

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

## 1.2. Сварочные аппараты и их внешние вольтамперные характеристики

Дуговую сварку плавлением выполняют постоянным или переменным током (рис. 2, 3, 4).

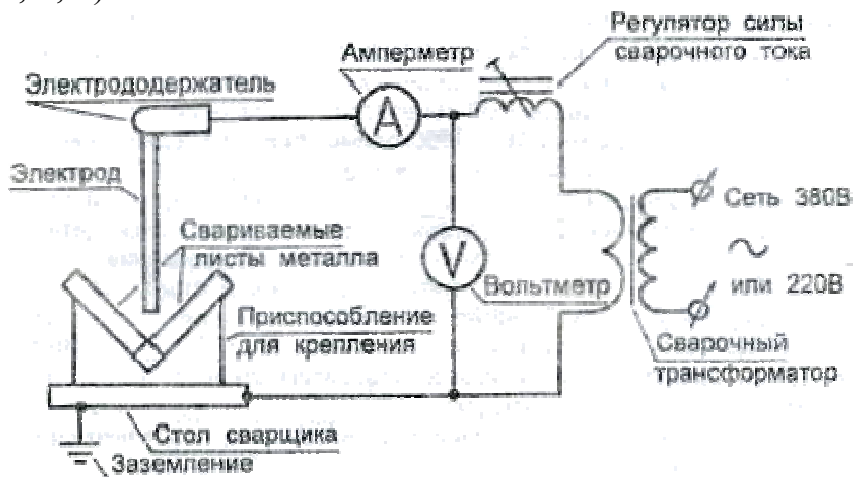


Рис. 2. Принципиальная схема сварки переменным током



Для сварки переменным током (рис. 2) применяют сварочные трансформаторы. Трансформатор понижает напряжение сети с 380 В 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.

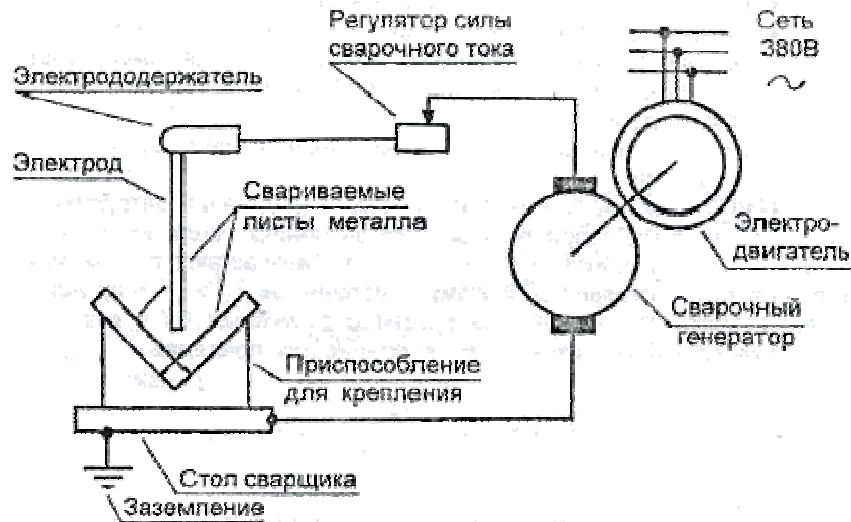


Рис. 3. Принципиальная схема сварки постоянным током

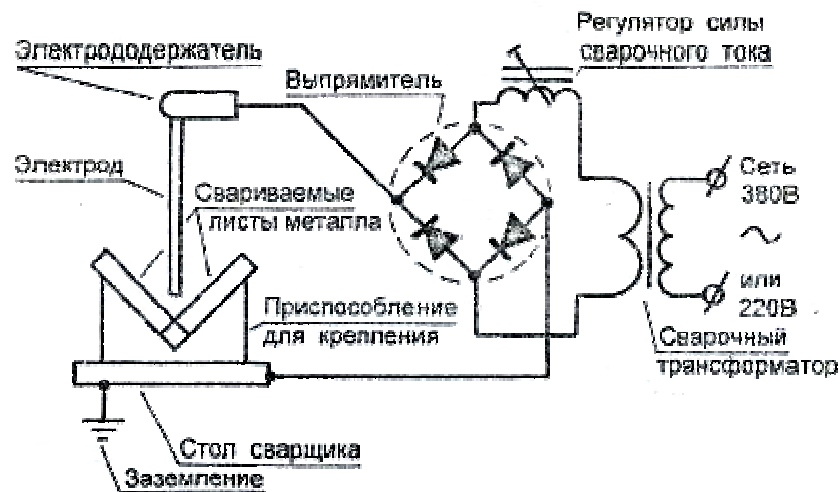


Рис. 4. Принципиальная схема сварки выпрямленным током

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 сете-

вой 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.

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.

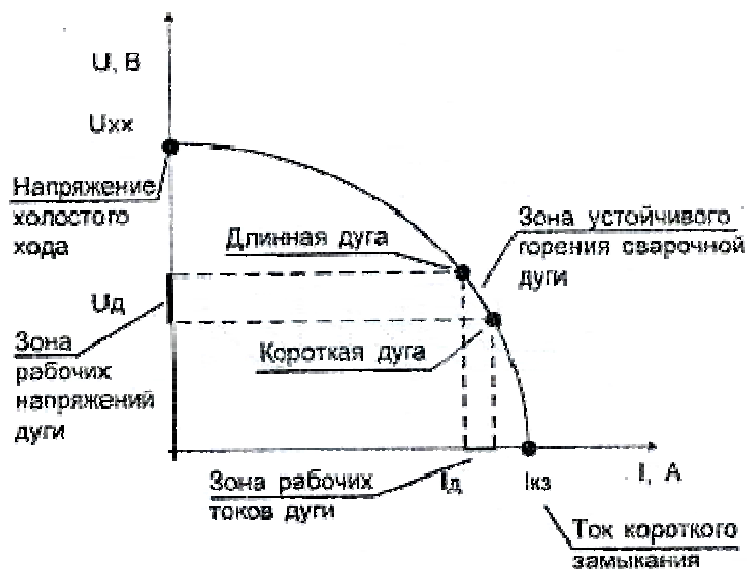


Рис. 5. Внешняя вольтамперная характеристика источника тока

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  $U_{хх} = 80$  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

$$1,25 < \frac{I_{кз}}{I_{св}} < 2,0. \quad (4)$$

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

$$\frac{U_{xx}}{U_{\phi}} = 1,8 \div 2,5. \quad (5)$$

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

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.

### 1.3. 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 и 7) являются:

- сердечник (магнитопровод);

- неподвижные катушки с первичной обмоткой;
- подвижные катушки с вторичной обмоткой.

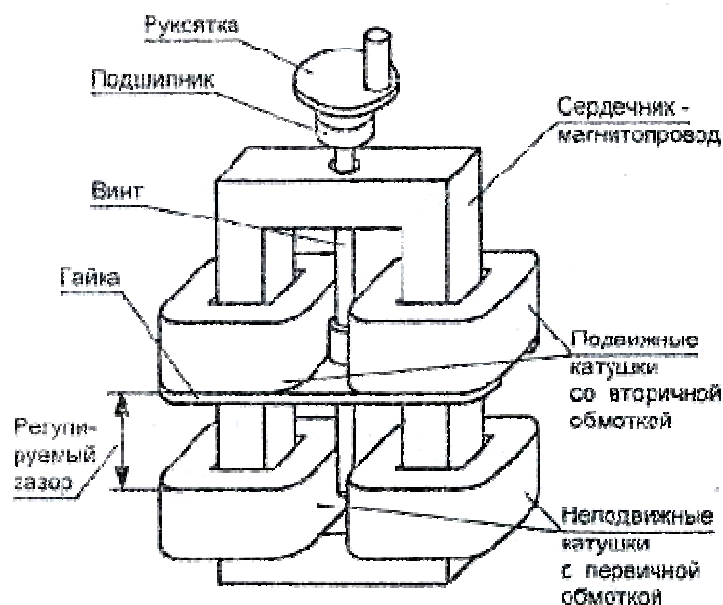


Рис. 6. Конструктивная схема сварочного трансформатора с подвижными катушками вторичной обмотки

Величину сварочного тока регулируют изменением расстояния между первичными и вторичными катушками благодаря подвижным вторичным катушкам.

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

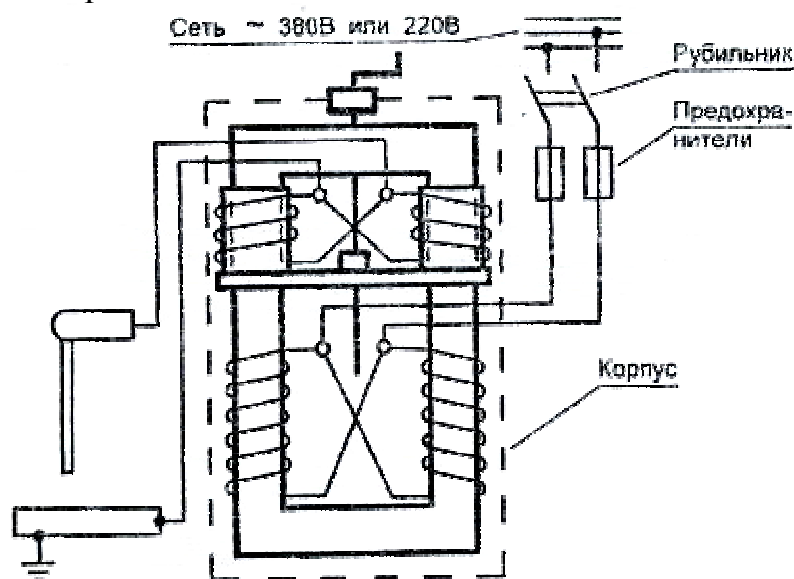


Рис. 7. Принципиальная электрическая схема сварочного трансформатора с подвижными катушками вторичной обмотки

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.

#### 1.4. Режимы работы сварочного трансформатора

Действие сварочного трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. Режим холостого хода трансформатора (рисунок 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  $U_2 = U_{xx}$ .

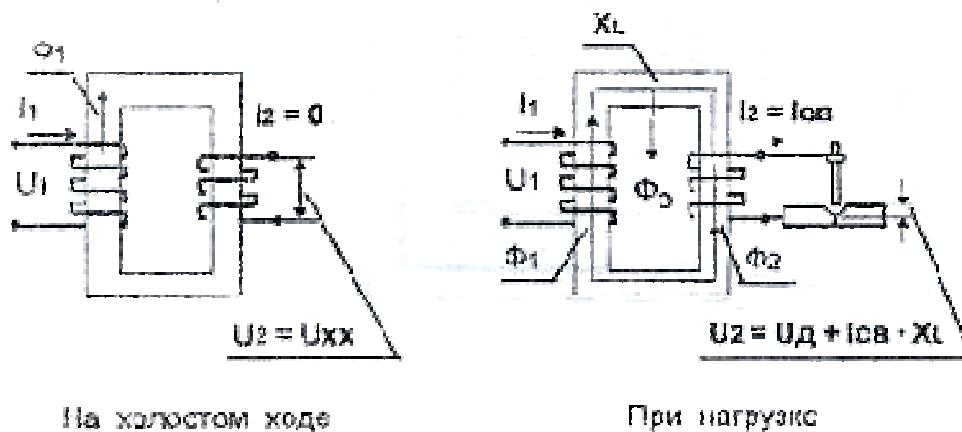


Рис. 8. Работа трансформатора

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  $w_2$ .

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} \quad (6)$$

В сварочных трансформаторах сетевое напряжение 220 В или 380 В преобразуется в более низкое напряжение холостого хода  $U_2 = U_{xx} = 60 \dots 80$  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  $\Phi_k$ . Противодействуя этому, сила тока в первичной обмотке увеличивается. Увеличение потребления энергии в первичной обмотке должно быть равно увеличению

отдачи энергии дуге вторичной обмотки в соответствии с законом сохранения энергии.

Напряжение во вторичной обмотке трансформатора при нагрузке равно

$$U_2 = U_D + I_{св} \cdot X_L, \quad (7)$$

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.

Часть магнитного потока  $\Phi_p$  по пути от первичной обмотки ко вторичной рассеивается в пространстве. Магнитный поток рассеивания тем больше, чем больше расстояние между обмотками (см. рисунки 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  $\Phi_p$ .

При этом напряжение дуги  $U_D$  уменьшается  $U_D = U_2 \cdot I_{св} \cdot X_L$  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  $U_{хх}$ .

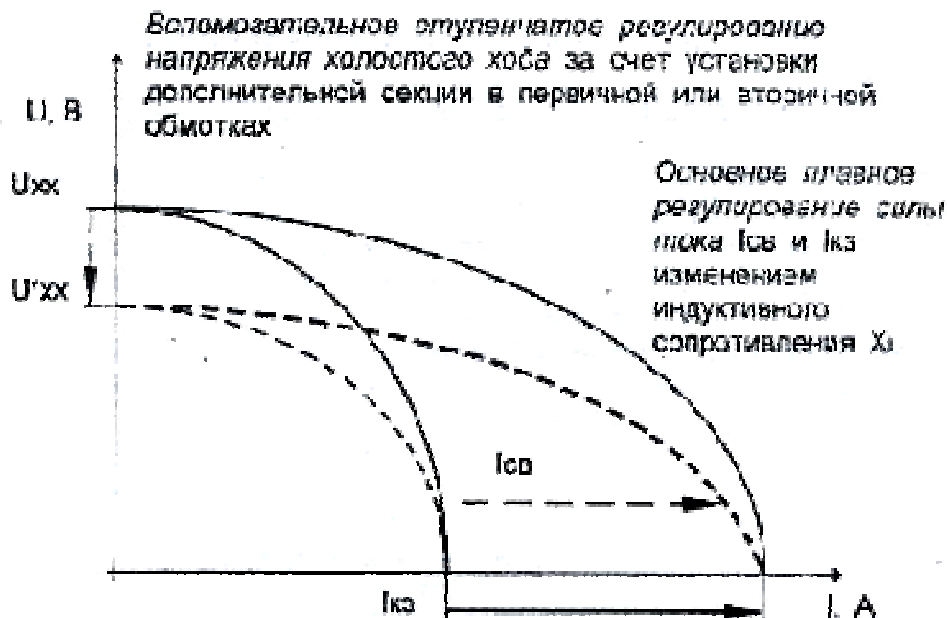


Рис. 9. Регулирование силы сварочного тока  $I_{св}$ , силы тока короткого замыкания  $I_{кз}$  и напряжения холостого хода  $U_{хх}$  трансформатора

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 вто-

ричной обмотке. При величине напряжения холостого хода  $U'_{xx}$ , как и при  $U_{xx}$  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 рисунке 6. Для получения диапазона малых токов катушки первичной и вторичной обмоток включаются последовательно.

Регулирование сварочного тока  $I_{св}$  (как и  $I_{кз}$ ) при постоянном напряжении холостого хода трансформатора  $U_{xx}$  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

$$I_{кз} = U_2 / X_L \quad (8).$$

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

### 1.5. 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.

В вариантах заданий (глава 7) предусмотрено пять групп сталей:

- низкоуглеродистые конструкционные стали обыкновенного качества;
- качественные низкоуглеродистые конструкционные стали;
- низколегированные конструкционные стали;
- легированные жаропрочные стали;
- легированные коррозионностойкие стали.

Обозначение низкоуглеродистой стали начинается со слова Сталь (Сталь 15, Сталь 20 - качественные стали) или начальных букв слова Сталь (Ст1, Ст2, Ст3, Ст4 - стали обыкновенного качества).

Чем больше цифра в обозначении конструкционной низкоуглеродистой стали обыкновенного качества (Ст1, Ст2, Ст3, Ст4), 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	Nb	Б	Бор	B	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.



емостью.

### 1.6. 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 (см. таблицу 6).

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 щелочноземельных 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, оксицеллюлоза, 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  $K_2O \cdot SiO_2$ , натриевое жидкое стекло  $Na_2O \cdot SiO_2$ ) 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 приме-

няемого 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°С.

- 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.

## 2. 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.

### 2.1 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.

Таблица 2

Стыковые 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		
С отбортовкой кромок	Односторонний			1...4	C1
Без скоса кромок					C2
Со скосом одной кромки					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

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

### Тип сварного соединения

Тип сварного соединения приведен в варианте задания.

### Площади поперечного сечения сварных швов и соединения

Площадь поперечного сечения основного наружного шва определяют по формуле

$$S_{осн} = \frac{A^2}{2} \cdot K_y, \text{ мм}^2 \quad (9)$$

где  $K_y$  - коэффициент увеличения. Коэффициент увеличения выбирают по таблице 4, в зависимости от величины катета  $A$ .

Таблица 4

Коэффициент увеличения $K_y$				
Катет шва $A$ или $C$ , мм	2,5...3	3,5...4	4,5...5,5	5,5...6
Коэффициент увеличения, $K_y$	1,5	1,45	1,4	1,35

Коэффициент увеличения учитывает наличие зазора между свариваемыми деталями и выпуклость (полноту) шва.

Площадь поперечного сечения внутреннего подварочного шва определяют аналогично

$$S_{вн} = \frac{C^2}{2} \cdot K_y, \text{ мм}^2 \quad (10)$$

$K_y$  выбирают по таблице 4, в зависимости от величины катета  $C$ .

Общая площадь поперечного сечения сварного соединения

$$S = S_{осн} + S_{вн}, \text{ мм}^2 \quad (11)$$

Толщину свариваемых заготовок  $A$  (толщина стенок ванны) и величину катета подварочного шва  $C$  выбирают в соответствии с вариантом задания.

### 2.2. 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.

Для уменьшения коробления свариваемой ванны необходимы определенный порядок и последовательность наложения сварных швов. На рисунке 11 приведен эскиз ванны с размерами, соответствующими примеру оформления отчета. Порядок наложения швов аналогичен во всех вариантах задания. Последовательность может быть разной.

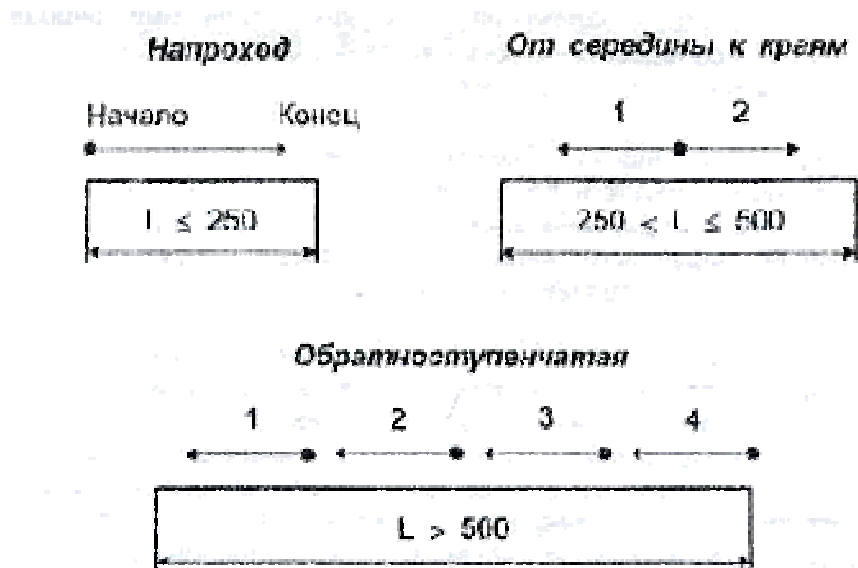


Рис. 10. Последовательность и направление наложения швов

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

### 2.3. 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.

#### *Марка электрода*

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. 6 в зависимости от марки свариваемой стали. Для расшифровки марки стали и сварочной проволоки следует изучить разделы 1.5 и 1.6.

#### *Диаметр электрода*

Диаметр электрода выбирают в зависимости от толщины свариваемого металла (табл. 5).

Таблица 5

## Выбор диаметра электрода

Толщина свариваемых листов, мм	3	4	5	6
Диаметр электрода $b_{эл}$ , мм	3	3	4	к

*Сила сварочного тока*

Силу сварочного тока определяют по формуле

$$I_{св} = I_{уд} \cdot d_{эл} \quad , \text{ А} \quad (12)$$

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

Значение  $I_{уд}$  для сварки легированных и низкоуглеродистых сталей приведены в табл. 8. 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.

Таблица 6

## Электроды для сварки сталей

Марка		Коэффициент расхода электродов на 1кг наплавленного металла к. кг	Коэффициент наплавки $K_n$ , г/(А ч)	Род тока	Полярность	Марка свариваемой стали
электродного покрытия	сварочной проволоки					
АНО-4С	Св-08 или Св-08А	1,7	8,5	Постоянный	Любая	Низкоуглеродистые Ст4, Сталь 20
				Переменный		С1, Сталь 15
МР-3	Св-08А	1,6	8,5	Постоянный	Обратная	Ст3, Сталь 25
				Переменный		Ст2, Сталь 10
Э-138/50Н	Св-10ГН	1,7	9	Постоянный	Обратная	Низколегированные 12ГС, 15ГФ, 14Г2.14ХГС
ЦЛ-45	Св-08ХМ	1,65	9,5			15ХСНД.12Х1МФ, 15Х1М1Ф.10ХСНД
ЭА-395/9	Св- 10Х16Н25АМ6	1,6	11			Легированные 08Х12Н8К5М2Т, 08Х12Н7К7М4
ЭА-400/10У	Св- 04Х19Н11М3	1,8	12			10Х17Н13М2Т, 08Х18Н10Т

Таблица 7

## Технические характеристики сварочных аппаратов

Вид аппарата	Тип	Диапазон регулирования сварочного тока $I_{св}$ , А	Напряжение, В		Мощность, кВт	Размеры, мм	Масса, кг
			рабочее $U_d$	холостого хода $U_{хх}$			
Трансформатор	ТСБ-90	60...100	20	36	3,3	203 370 350	30
	ТД-102У2	60...160	26	70	11,2	570 320 530	42
	ТД-300 У2	70...365	32	61,80	19,4	692 710 620	137
	ТД-500 У2	90...650	30	59,76	32,0	570 720 835	200
Выпрямитель	ВКС-120	30.. .130	25 28 40	65	4,8	785 628 953	242
	ВД-201 УЗ	30... 200 50...		68	15,0	622 716 775	120
	ВД-502-1	500		80	42,0	810 550 1077	348
Преобразователь	ПСО-120	30 ...120	25 30 40	48... 65	4,0	1055 550 730	155
	ПСУ-300	50... .300 60...		48	28,0	1160 490 740	315
	ПСУ-500-2	500		48	30,0	1075 650 1085	595

Примечание. Напряжение питающей сети для ТСБ-90-220В, для всех остальных сварочных аппаратов – 380 В.

Таблица 8

Сила тока  $I_{уд}$ , приходящаяся на 1 мм диаметра электрода

Легированные стали	$I_{уд} = 45... 45 \text{ А/мм}$
Низкоуглеродистые стали	$I_{уд} = 45... 50 \text{ А/мм}$

*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. Используя таблицу 7, выбирают тот сварочный аппарат, в диапазон регулирования которого попадает рассчитанное значение  $I_{св}$ .

*Род тока и полярность*

Род тока и полярность выбирают в зависимости от физико-механических свойств свариваемой стали и используемой марки электрода. С целью упрощения выбора в таблице 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.

*Напряжение дуги*

Рабочее напряжение дуги определяется ее длиной и колеблется в пре-



делах  $U_d = 20...40$  В (см. табл. 7).

#### Масса наплавленного металла

Масса наплавленного металла основных наружных швов

$$G_H^{OCH} = \frac{S_{OCH}}{1000} \cdot L_{OCH} \cdot \rho, \text{ г} \quad (13)$$

где  $S_{OCH}$  - площадь поперечного сечения основного наружного шва,  $\text{мм}^2$ ;

$L_{OCH}$  - суммарная длина основных сварных швов, мм;

$\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$  - плотность наплавленного металла.

Массу наплавленного металла подварочных швов находят аналогично

$$G_H^{BH} = \frac{S_{BH}}{1000} \cdot L_{BH} \cdot \rho, \text{ г} \quad (14)$$

где  $S_{BH}$  - площадь подварочного шва,  $\text{мм}^2$ ;

$L_{BH}$  - суммарная длина подварочных сварных швов, мм.

Общая масса наплавленного металла сварных соединений при соединении элементов металлической ванны

$$G_H = G_H^{OCH} + G_H^{BH}, \text{ г} \quad (15)$$

#### РАСХОД ЭЛЕКТРОДОВ

Расход электродов на изготовление металлической ванны

$$G_{эл} = k \cdot G_H, \text{ г} \quad (16)$$

где  $k = 1,6...1,8$  - коэффициент расхода электродов на 1 кг наплавленного металла. В таблице 6 заданы конкретные значения  $k$ . Коэффициент расхода  $k$  учитывает:

- массу электродного покрытия;
- потери металла на угар, разбрызгивание и огарки.

#### ВРЕМЯ СВАРКИ

Время, необходимое для выполнения сварочных работ

$$T_{св} = T_{осн} + T_{обсл} + T_{под} + T_{отд}, \text{ ч} \quad (17)$$

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

$$T_{осн} = \frac{G_H}{K_H \cdot I_{св}}, \quad (18)$$

где  $G_H$  - масса наплавленного металла;

$K_H$  - коэффициент наплавки, г/(А • ч);

$I_{св}$  - сила сварочного тока, А.

Коэффициент наплавки  $K_H$  [ г/(А • ч) ] - масса наплавленного на поверхность детали металла в граммах за 1 час, приходящаяся на силу тока в 1 ампер. В табл. 6 даны величины коэффициента наплавки для различных марок электродов.

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

$$T_{св} = \frac{T_{осн}}{K_{исп}}, \quad \text{ч} \quad (19)$$

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 приведены в табл. 9.

Таблица 9

Коэффициент использования сварочного поста  $K_{исп}$

При работе в цехе	$K_{исп} = 0,6..0,8$
При монтажных работах	$K_{исп} = 0,5..0,7$

## ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И СКОРОСТЬ СВАРКИ

Производительность сварки

$$G = K_H \cdot I_{св}, \quad \text{г/ч} \quad (20).$$

Скорость сварки при формировании основного шва

$$v_{св}^{осн} = \frac{K_H \cdot I_{св}}{\rho \cdot S_{осн}}, \quad \text{м/ч} \quad (21).$$

Скорость сварки при формировании внутреннего шва

$$v_{св}^{вн} = \frac{K_H \cdot I_{св}}{\rho \cdot S_{вн}}, \quad \text{м/ч} \quad (22)$$

## РАСХОД ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Расход электроэнергии рассчитывают, используя формулу

$$Q = 0,001 \cdot U_d \cdot I_{св} \cdot T_{осн}, \quad (23)$$

где  $U_d$  - рабочее напряжение дуги, В;

$I_{св}$  - сила сварочного тока, А;

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

### 3. 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 вольтамперной характеристики, как показано на рис. 11.

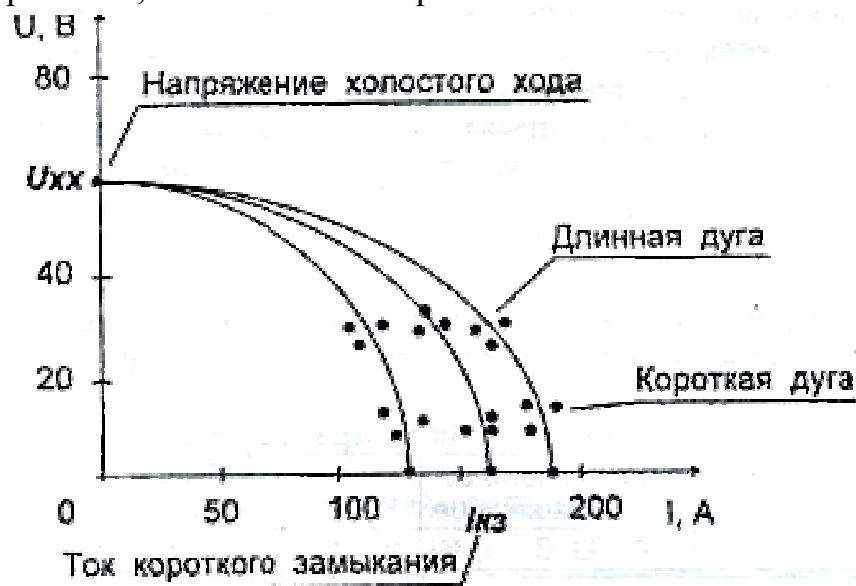


Рис. 11. Внешние вольтамперные характеристики сварочного трансформатора

### 4. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ 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.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник конструктора-инструментальщика / В.П. Шатин, Ю.В. Шатин. – М.: Машиностроение, 1975. – 456 с.; ил.
2. Справочник инструментальщика / И. А. Ординарцев, Г. В. Филиппов, А. Н. Шевченко и др.; под общ. ред. И. А. Ординцева. – Л.: Машиностроение, 1987. – 840 с.
3. Нарожных, А.Т. и др. Проектирование протяжек: учеб. пособие / А.Т. Нарожных, Г.Г. Скребнев, Д.В. Соколов. – Волгоград: ВолгГТУ, 1995. – 85 с.; ил.
4. Основы проектирования режущих инструментов с применением ЭВМ: учеб. пособие для машиностр. спец. вузов / П.И. Ящерицин, Б.И. Синицин, И.А. Басс. – Мн.: Выш. школа, 1979. – 304 с., ил.

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

№ вари-анта	Размеры ванны, мм			Толщина стенок А, мм		Катет шва С, мм	Материал заготовок	
	b	l	h	Тип соединения			Группа сталей	Обозначение
<i>Работа в цехе (см. табл. 9)</i>								
1	400	500	200	3	У5	2,5	Конструкци-онные низкоуглеродистые стали обыкновенного качества	Ст 2
2В	400	500	200	3	У7	2,6		Ст 4
3	400	600	200	4	У5	3,5		Ст 1
4П	400	600	200	4	У7	3,6		Ст 3
5	400	700	200	5	У5	4,5		Ст 2
6В	400	700	200	5	У7	4,6		Ст 4
7	400	800	200	6	У5	5,5		Ст 1
8П	400	800	200	6	У7	5,6		Ст 3
9	500	600	400	3	У5	2,7	Качественные низкоуглеродистые конструкционные стали	Сталь 10
10В	500	800	400	3	У7	2,8		Сталь 20
11	600	800	400	4	У5	3,7		Сталь 15
12П	600	800	400	4	У7	3,8		Сталь 25
13	700	800	400	5	У5	4,7		Сталь 10
14В	700	800	400	5	У7	4,8		Сталь 20
15	800	800	400	6	У5	5,7		Сталь 15
16П	800	800	400	6	У7	5,8		Сталь 25
<i>Монтажные работы (см. табл. 9)</i>								
17П	600	1000	300	3	У5	Низколегированные конструкционные стали	2ГС 15ХСНД 16ГФ 12Х1МФ 14Г2 15Х1М10 14ХГС 10ХСНД	
18В	600	1000	300	3	У7			
19П	600	1000	400	4	У5			
20В	600	1000	400	4	У7			
21П	600	1000	500	5	У5			
22В	600	1000	500	5	У7			
23П	600	1000	500	6	У5			
24В	600	1000	500	6	У7			
25П	400	900	200	3	У5	Легированные жаропрочные стали	08Х12Н3К5М2Т	
26В	400	900	200	3	У7		10Х17Н13М2Т	
27П	900	800	400	4	У5		08Х12Н7<7М4	
28В	900	800	400	4	У7	Легированные коррозионно-стойкие стали	08Х16Н10Т	
29П	600	1000	700	5	У5		08Х12Н3К5М2Т	
30В	600	1000	700	5	У7		08Н18Н10Т	

**Примечание.** Буква П в номере варианта - использовать сварочный преобразователь, В - выпрямитель, отсутствие буквы - трансформатор.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Теоретические сведения.....	3
2. Разработка технологического процесса сварки резервуара.....	15
3. Порядок снятия внешней вольтамперной характеристики сварочного трансформатора.....	23
4. Последовательность выполнения работы.....	23
Библиографический список.....	24
Приложение.....	25

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению практических работ для студентов  
направления 15.03.01 «Машиностроение»  
(профиль «Технология, оборудование и автоматизация  
машиностроительных производств»)  
всех форм обучения

**Составитель**  
**Жачкин Сергей Юрьевич**

Издается в авторской редакции

Подписано к изданию 26.05.2022.  
Уч.-изд. л. 1,3.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»  
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84