

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 08.10.2023 15:21:08  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb175d426d39e5f1c11ca9bf73e943df4a4851fdb56d089

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)  
Кафедра машиностроительных технологий и оборудования

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе  
Локтионова  
« *Л* » 2021 г.



### ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

Методические указания по выполнению практических работ  
для студентов направления подготовки 15.03.01 Машиностроение  
профиль «Оборудование и технология сварочного производства»

УДК 621.791

Составитель Н.И. Иванов

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент кафедры  
машиностроительных технологий и оборудования *А.Н. Гречухин*

**Технология и оборудование сварки плавлением:** методические указания по выполнению практических работ / Юго-Зап. гос. ун-т; сост. Н.И. Иванов. Курск, 2021. – 27 с., ил. 6, табл. 17, прилож. 1. Библиогр.: с. 22.

Излагаются методические рекомендации к выполнению практических работ по дисциплине «Технология и оборудование сварки плавлением». Указываются порядок выполнения и оформления отчетов по практическим работам.

Методические указания соответствуют требованиям ФГОС ВО по направлению подготовки бакалавров 15.03.01 Машиностроение (профиль «Оборудование и технология сварочного производства»).

Работа предназначена для студентов дневной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *14.12.21* Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. . Уч. - изд. л. . Тираж экз. Заказ *100* Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## **Практическая работа № 1. Определение расчетным путем параметров режима для ручной дуговой сварки металлическими электродами с покрытием низколегированных низкоуглеродистых сталей**

### 1.1 Общие сведения

Низколегированные низкоуглеродистые стали (объем легирования до 4 %, содержание углерода до 0,25 %) перлитного класса широко используют в различных конструкциях взамен углеродистых. Они обеспечивают снижение металлоёмкости на 20...50 %. Применяются в строительстве трубопроводов, мостов, сосудов для нефтехимического производства и др. Эти стали относят к хорошо свариваемым при соблюдении температурного режима (скорости охлаждения сварного шва). Увеличение содержания легирующих элементов оказывает существенное влияние на свариваемость, повышая закаливаемость, что сопровождается снижением сопротивления сварных соединений образованию холодных трещин. Технология сварки должна проектироваться с учетом того, что при уменьшении погонной энергии сварки и увеличении интенсивности охлаждения зоны термического влияния возрастает вероятность распада аустенита с образованием закалочных структур, что снижает сопротивляемость сварных соединений образованию холодных трещин и хрупкому разрушению. При повышенных значениях погонной энергии наблюдается рост зерна аустенита, может формироваться грубо зернистая феррито-перлитная структура видманштеттового типа с пониженной ударной вязкостью.

Ручную дуговую сварку низколегированных сталей осуществляют электродами типа Э46А и Э50А с фтористо-кальциевым покрытием, которые позволяют достигать более высокую стойкость против образования кристаллизационных трещин и повышенную пластичность по сравнению с электродами других типов. Для сталей марок 09Г2, 09Г2С, 16ГС, 17ГС, 10Г2, 10Г2С1 рекомендуют применять электроды УОНИ 13/55, К-5А, АНО-11. Для сварки кольцевых швов трубопроводов, работающих при температурах до -70 °С применяют электроды ВСН-3.

### 1.2 Расчет режимов ручной дуговой сварки

Расчет режимов ручной дуговой сварки покрытыми металлическими электродами проводится в следующем порядке:

1.2.1 Выбирается по ГОСТ 5264-80 форма и конструктивные элементы подготовки кромок на стандартные сварные соединения исходя из толщины свариваемого изделия. При этом следует иметь в виду, что для одной в той же толщины свариваемого металла имеется несколько вариантов выполнения подготовки кромок, причем с увеличением толщины количество вариантов растет. Поэтому при выборе оптимального варианта необходимо, исходя из конструкции сварного изделия и технических условий на его изготовление, оценить доступ к сварному шву с лицевой и обратной стороны и возможности кантовки изделия, условия выполнения корневого шва и необходимость обеспечения обратного формирования корня шва. На основании этого устанавливается наиболее приемлемая в технологическом отношении возможная форма подготовки кромок.

В случае средних и больших толщин предпочтение отдается двухсторонним швам. Поочередная сварка с лицевой и обратной стороны снижает остаточные угловые деформации, позволяет получить качественные корневые швы, снизить массу наплавленного металла. Однако в этом случае необходимо обеспечить кантовку изделия. В монтажных условиях двухсторонний доступ к шву и кантовка соединения может оказаться невозможными, и характер выполнения швов будет односторонний.

На основании рекомендаций по ГОСТ 5264-80 вычерчивается в масштабе на миллиметровой бумаге выбранный тип подготовки кромок под сварку.

1.2.2 Исходя из состава свариваемого материала и толщины, выбирается тип, марка и диаметр электрода. При этом следует пользоваться рекомендациями таблиц 1.1 и 1.2.

Таблица 1.1 – Выбор диаметра электрода для стыкового шва

Толщина свариваемого изделия, мм	1÷2	3	4÷5	6÷12	13 и более
Диаметр электрода, мм	1,5÷2,0	3	3÷4	4÷5	5

Таблица 1.2 – Выбор диаметра электрода для углового шва

Катет углового шва, мм		2	2,5	3÷7,5	8÷9	более 9
Диаметр электрода, мм	Сварка в «угол»	2,5	2,5÷3	3÷4	4÷5	5÷6
	Сварка в «лодочку»	2,5÷3	3	3÷5	5÷6	5÷6

При выборе диаметра электрода следует иметь в виду:

- при сварке первого (корневого) шва стыковых и угловых многопроходных швов диаметр электрода выбирается не более 4 мм, чтобы обеспечить необходимый доступ в глубину разделки;
- при сварке вертикальных стыковых и угловых швов допускается диаметр электрода не более 5 мм, а горизонтальных и потолочных швов – не более 4 мм для предупреждения вытекания металла из сварочной ванны.

Тип и марку электродов выбирают по рекомендациям, приведенным в таблице П.3 приложения.

1.2.3 В зависимости от состава и типа покрытия определяется род тока и полярность (см. таблицу П.3. При использовании покрытий типа *Б* применяется как правило постоянный ток обратной полярности.

1.2.4 Определяется число проходов. При этом следует иметь в виду, что максимальное поперечное сечение металла, наплавленного за один проход, не должно превышать 30...40 мм<sup>2</sup>. При сварке угловых швов за один проход выполняют швы катетом не более 8...9 мм.

Число проходов определяют по формуле

$$n = (F_{\text{ш}} - F_1) / F_n + 1, \quad (1.1)$$

где:  $F_{\text{ш}}$  – общая площадь поперечного сечения шва, см<sup>2</sup>;

$F_1$  – площадь поперечного сечения первого валика, см<sup>2</sup>;

$F_n$  – площадь поперечного сечения последующих валиков, см<sup>2</sup>.

Общую площадь поперечного сечения сварного шва можно определить по графикам (см. рисунки 1.1 и 1.2), либо расчетным путем, как сумму площадей элементарных геометрических фигур (см. рисунок 1.3).

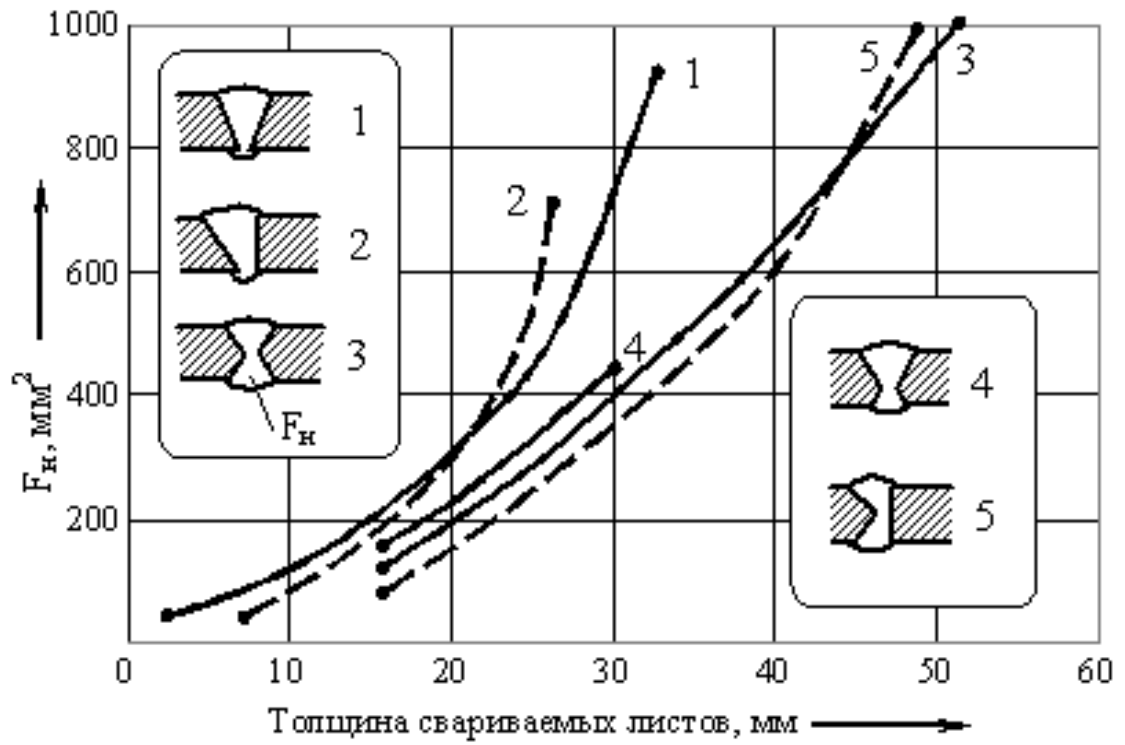


Рисунок 1.1 – График для определения площади наплавленного металла в стыковом шве

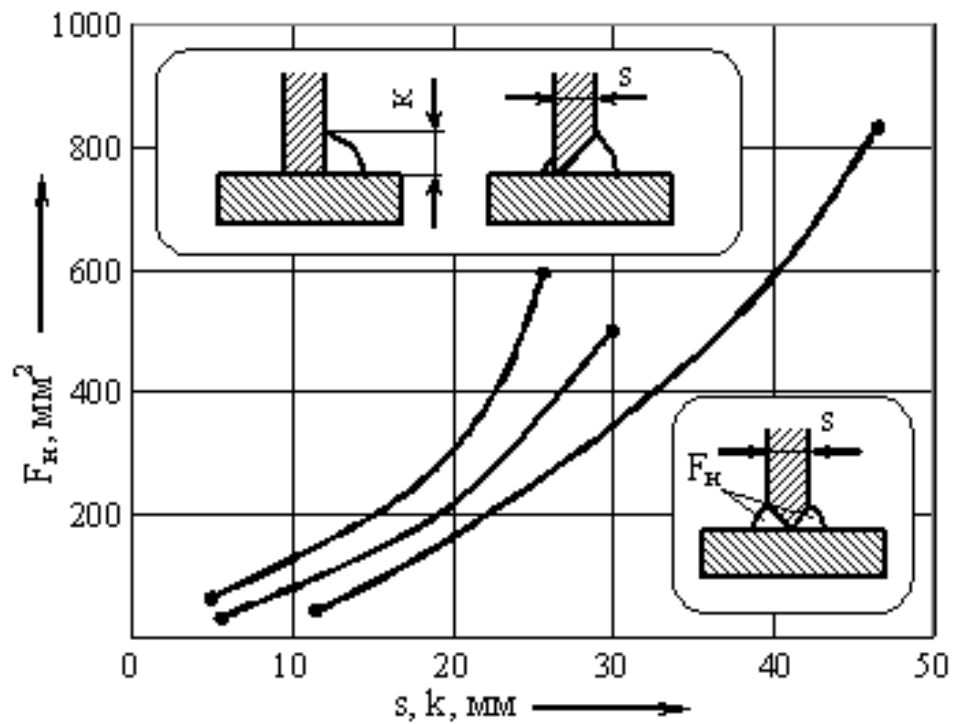


Рисунок. 1.2 – График для определения площади наплавленного металла в угловом шве

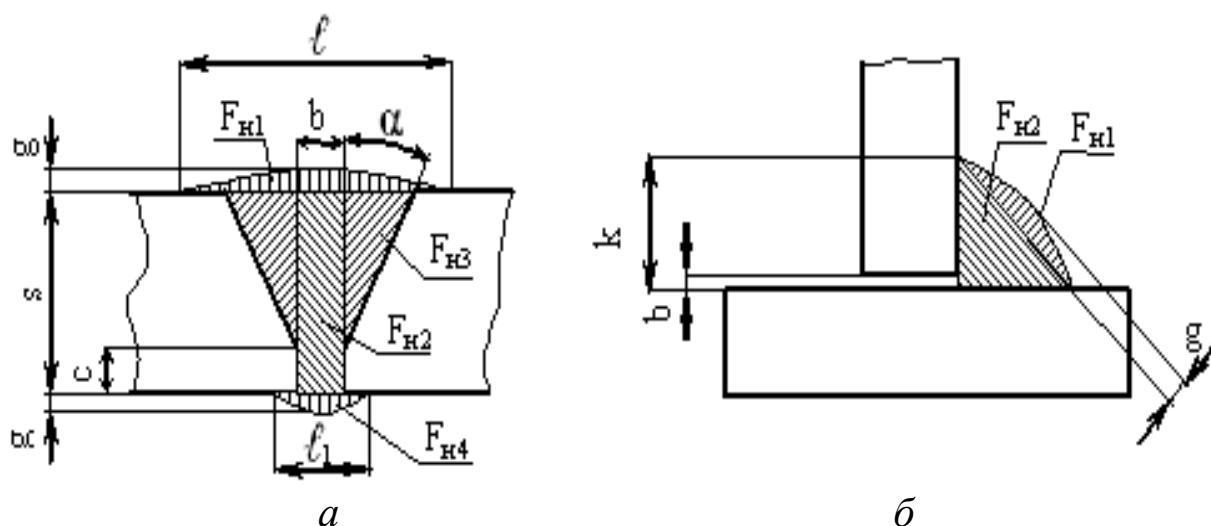


Рисунок 1.3 – Схема разбивки сечения наплавленного металла:  
*a* – стыковой шов; *б* – угловой шов

Для стыкового шва:

$$F_{ш} = F_{н1} + F_{н2} + F_{н3} + F_{н4} = 0,75 \ell \cdot g + b \cdot S + (S-c)^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha + 0,75 \ell_1 \cdot g \quad (1.2)$$

Для углового шва:

$$F_{ш} = F_{н1} + F_{н2} = 1,06 kg + 0,5 k^2 \quad (1.3)$$

Площадь поперечного сечения первого валика определяется по формуле:

$$F_1 = (6 \dots 8) d_э \quad (1.4)$$

Площадь поперечного сечения последующих валиков определяется по формуле:

$$F_n = (8 \dots 12) d_э \quad (1.5)$$

1.2.5 Определяется сила сварочного тока. Величина сварочного тока зависит от диаметра электрода, состава и типа покрытия, положения шва в пространстве. Нижний предел тока ограничивается стабильностью процесса сварки, верхний – допустимой температурой нагрева покрытия (для типа покрытия *A*, *B* и *P* – не более 600 °С, для *Ц* – не более 200 °С), хорошим формированием шва и др.

Для приближенных расчетов:

$$I_{св} = (K_1 + K_2 d_э) d_э, \quad (1.6)$$

где  $K_1$  – коэффициент,  $K_1 = 20$ ;

$K_2$  – коэффициент, определяется в зависимости от типа покрытия и положения шва в пространстве по таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Значения коэффициентов  $K_2$

Тип покрытия	Пространственное положение шва		
	Нижнее	Вертикальное	Горизонтальное и потолочное
Кислое А	$\frac{4,6...6,8}{5,7}$	$\frac{2,4...4,1}{3,3}$	$\frac{3,7...5,7}{4,7}$
Рутиловое Р	$\frac{4,6...7,3}{6,0}$	$\frac{2,8...4,4}{3,7}$	$\frac{3,8...6,1}{5,0}$
Основное Б	$\frac{2,6...4,7}{3,6}$	$\frac{1,6...2,8}{2,2}$	$\frac{1,7...3,1}{2,4}$
Целлюлозное Ц	$\frac{2,0...4,6}{3,3}$	$\frac{1,6...3,4}{2,5}$	$\frac{1,6...3,4}{2,5}$

В таблице 1.3 приведены предельные значения. Большие значения  $K_2$  соответствуют меньшим диаметрам электродов 1,3...3 мм.

1.2.6 Определяется напряжение дуги  $U_d$  в зависимости от типа покрытия и уточняется по паспортным данным для каждой марки электродов (см. таблица П.3).

1.2.7 Скорость сварки (скорость перемещения дуги)

$$v_{св} = \frac{\alpha_n I_{св}}{36 \rho F_n}, \quad (\text{см/с}), \quad (1.7)$$

где:  $\alpha_n$  – коэффициент наплавки, г/А·ч, определяется по таблице П.1;

$\rho$  – плотность наплавленного металла, г/см<sup>3</sup>;

$F_n$  – площадь поперечного сечения наплавленного за 1 проход металла, см<sup>2</sup>.

Погонная энергия сварки

$$q_n = \frac{\eta I_{св} U_d}{v_{св}}, \quad (\text{Дж/см}), \quad (1.8)$$



где  $\eta$  – эффективный КПД дуги, для РДС  $\eta = 0,7$ ;  
 $v_{св}$  – скорость сварки, см/с.

1.2.8 Глубина провара определяется по формуле

$$H_{пр} = (0,5 \div 0,7) \cdot 0,0112 \sqrt{q_{п}}, \text{ (см)} \quad (1.9)$$

1.2.9 Определяется мгновенная скорость охлаждения при температуре наименьшей устойчивости аустенита. Для однопроходной сварки листов толщиной  $s$  встык со сквозным проплавлением

$$\omega_{охл} = 2\pi\lambda c_p \frac{(T_m - T_0)^3}{(q_{п}/s)^2}, \text{ (}^\circ\text{C/с)}, \quad (1.10)$$

где :  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(см · °C),  $\lambda = 0,4$ ;

$c_p$  – объемная теплоемкость, Дж/(см<sup>3</sup> · °C),  $c_p = 4,3$ ;

$T_0$  – начальная температура изделия перед сваркой; °C;

$T_m$  – температура наименьшей устойчивости аустенита, °C.

Для большинства конструкционных сталей  $T_m$  лежит в пределах (500...600) °C . Для расчетов следует принять среднее значение  $T_m = 550$  °C.

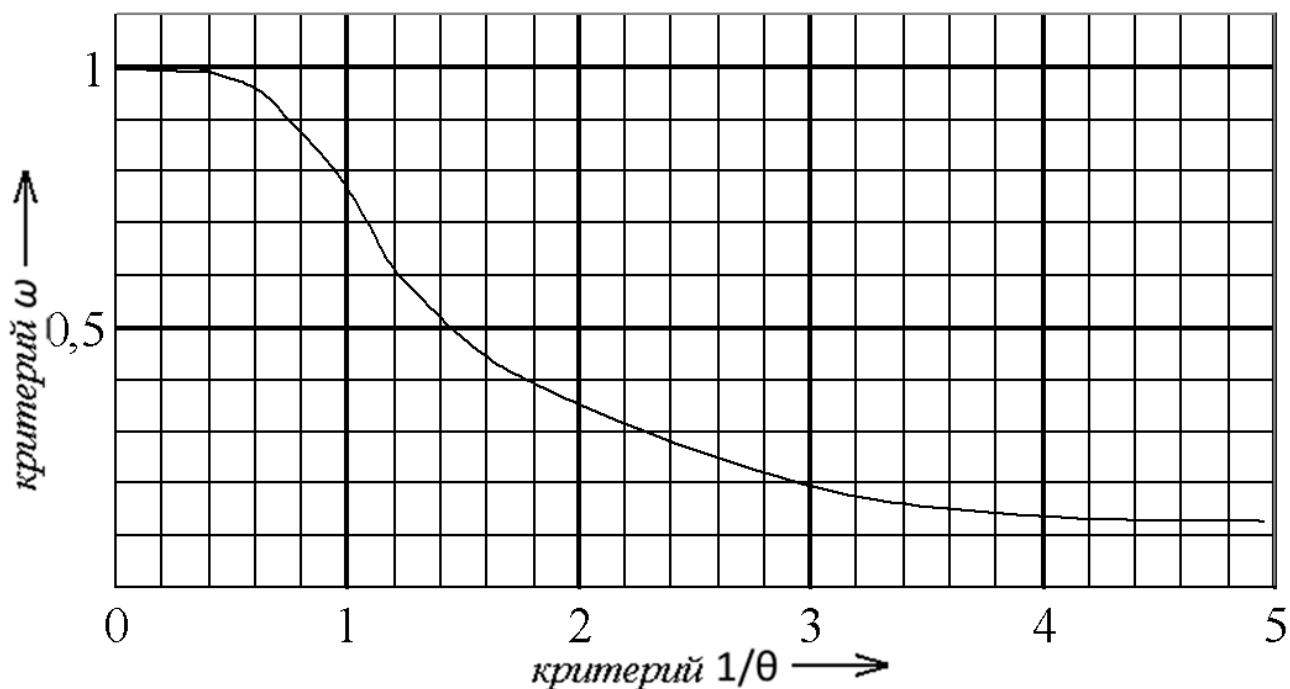
Для многослойной сварки стыковых и угловых швов скорость охлаждения при сварке первого слоя определяется по формуле

$$\omega_{охл} = \omega \frac{2\pi\lambda(T_m - T_0)^2}{q_{п}}, \quad (1.11)$$

где  $\omega$  – безразмерный критерий процесса, который зависит от другого безразмерного критерия  $1/\theta$ , который определяется по формуле

$$1/\theta = \frac{2q_{п}}{\pi s^2 c_p (T_m - T_0)}. \quad (1.12)$$

Для определения  $\omega = f(1/\theta)$  построен график, приведенный на рисунке 1.4.

Рисунок 1.4 – График для расчета критерия  $\omega$ 

При использовании формулы (1.12) для сварки различных типов соединений используются поправочные коэффициенты  $K_1$ , учитывающий разделку шва, и  $K_2$  приведения толщины  $s$ . Для расчета скорости охлаждения при сварке 1-го слоя шва в формулы следует подставлять не истинные значения погонной энергии  $q_n$  и толщины металла  $s$ , а приведенные:

$$q_{n \text{ пр}} = K_1 q_n; \quad s_{\text{пр}} = K_2 s. \quad (1.13)$$

Значения коэффициентов приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Значения поправочных коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$ .

Коэффициент	Соединение		
	Стыковое 60°	Тавровое	Крестовое
$K_1$	3/2	2/3	1/2
$K_2$	3/2	1	1

Полученное значение мгновенной скорости охлаждения сварного шва сравнивают с допустимыми скоростями, приведенными в таблице П.2 приложения. Если скорость охлаждения окажется больше допусти-

мой, то следует путем подбора температуры предварительного подогрева ( $T_0$ ) добиться нужной скорости охлаждения. В том случае, если предварительный подогрев изделия перед сваркой обеспечить невозможно, следует использовать технологические приемы (сварка каскадом, горкой, блоками).

Если скорость сварки окажется меньше допускаемой (при этом в стали имеет место рост зерна, что отрицательно сказывается на пластичности металла зоны термического влияния), следует для получения нужной скорости охлаждения увеличить скорость сварки, т.е. уменьшить погонную энергию сварки.

### 1.3 Указания к выполнению расчета

Целью расчета является определение конструктивных и технологических параметров процесса ручной дуговой сварки изделия из низколегированной стали заданной марки и толщины (таблица П.1 приложения), обеспечивающих допустимое значение мгновенной скорости охлаждения сварного шва. Расчет ведется в следующей последовательности.

- 1) По ГОСТ 5264-80 выбирается форма и конструктивные элементы подготовки кромок.
- 2) Вычерчивается в масштабе выбранный тип подготовки кромок под сварку.
- 3) Исходя из состава свариваемого материала и толщины, выбирается тип, марка и диаметр электрода (таблицы 1.1 и 1.2, таблица П.3).
- 4) Определяется требуемое число проходов по формуле (1.1).
- 5) Рассчитывается сила сварочного тока по формуле (1.6).
- 6) Определяется напряжение дуги  $U_d$  (таблица П.3).
- 7) По формуле (1.7) рассчитывается скорость сварки.
- 8) По формулам (1.8 и 1.9) определяется глубина провара.
- 9) Рассчитывается мгновенная скорость охлаждения по формулам (1.10 или 1.11).
- 10) Полученное расчетом значение мгновенной скорости охлаждения сварного шва сравнивают с допустимыми скоростями, приведенными в таблице П.2 приложения.

Если рассчитанное значение скорости охлаждения окажется больше допустимой, то следует путем подбора температуры предварительного подогрева ( $T_0$ ) добиться нужной скорости охлаждения.

## 1.4 Требования к оформлению отчета

При оформлении отчета по работе требуется записать:

- исходные данные к расчету (задаются преподавателем: марка материала, его химический состав и механические свойства, толщина свариваемых деталей и тип соединения);
- привести рисунок выбранного типа подготовки кромок под сварку с необходимыми для расчетов размерами;
- порядок расчета основных технологических параметров процесса сварки;
- выводы по рассчитанному значению скорости охлаждения.

## **Практическая работа № 2. Расчет режимов для механизированной дуговой сварки низколегированных сталей**

### 2.1 Общие сведения

В качестве флюсов при сварке низколегированных низкоуглеродистых сталей одной дугой применяют сильно окислительные флюсы марок АН-348А и ОСЦ-45, а при многодуговой сварке при повышенной скорости – АН-60.

Для сталей марок 16ГС, 09Г2С, 10Г2С1 при эксплуатации не ниже  $-40$  °С рекомендуется использовать сварочные проволоки Св-08ГА, Св10-10ГА, а при температурах эксплуатации до  $-70$  °С – сварочные проволоки Св-10НМА, Св-10НЮ, Св-10МХ с целью обеспечения достаточного уровня ударной вязкости.

Для соединения низколегированных низкоуглеродистых сталей в основном используется сварка в среде  $\text{CO}_2$ . Аргон и гелий находят ограниченное применение – только при сварке конструкций ответственного назначения. Для сварки в среде  $\text{CO}_2$  используют проволоки Св-08ГС и Св-08Г2С. На свойства металла шва значительное влияние оказывает качество углекислого газа. При повышенном содержании азота и водорода, а также влаги в швах могут образоваться поры.

Расчет режимов механизированной сварки (под флюсом и в среде защитных газов) выполняется в следующей последовательности:

- а) расчет режимов сварки;

б) определение размеров сварных швов для рассчитанных режимов;

в) определение мгновенной скорости охлаждения околошовной зоны (ОШЗ) и сравнение её с допускаемой.

## 2.2 Расчет режимов сварки стыковых швов

По ГОСТ 8712-79 (сварка под флюсом) и ГОСТ 14776-76 (сварка в среде защитных газов) выбираются форма и конструктивные элементы подготовки кромок под сварку (рисунок 2.1)

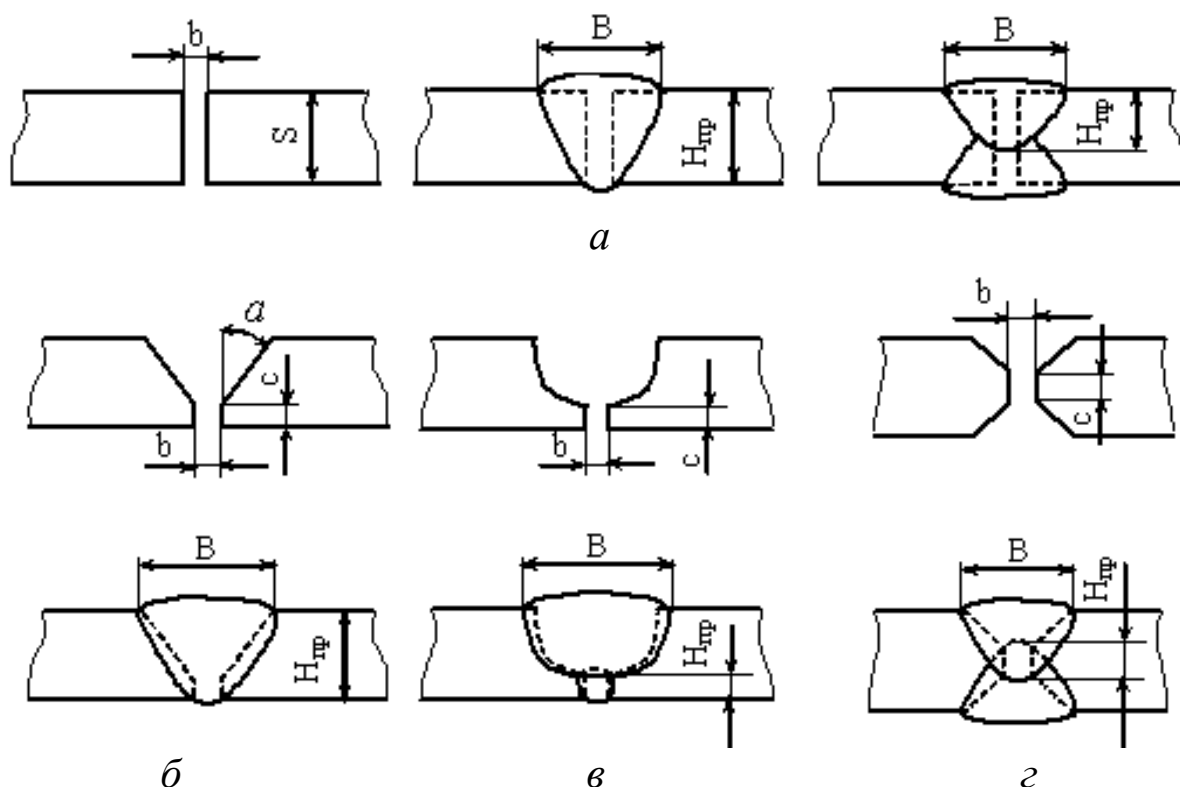


Рисунок 2.1 – Способы разделки кромок под сварку: *a* – без разделки кромок; *б* – V-образная разделка; *в* – U-образная разделка; *г* – X-образная разделка

Задаются необходимой глубиной проплавления  $H$ :

1) при односторонней сварке

$$H = S + (1 \dots 2) \text{ мм}; \quad (2.1)$$

2) при двусторонней сварке

$$H = S / 2 + 2 \text{ мм}; \quad (2.2)$$

где  $S$  – толщина свариваемого металла, мм;

3) при сварке швов с предварительной разделкой кромок под сварку глубине провара для первого прохода принимают  $H = c$ , где  $c$  – величина притупления в мм.

Исходя из состава свариваемой стали, выбирают сварочные материалы – защитную среду (марку флюса или защитного газа), которая оказывает влияние на величину сварочного тока, а также марку сварочной проволоки.

Из таблиц 2.1 – 2.4 выбирается диаметр электродной проволоки.

Таблица 2.1 – Рекомендуемый диаметр электродной проволоки для односторонней сварки под флюсом без разделки кромок

Толщина металла $S$ , мм	$d_э$ , мм	Толщина металла $S$ , мм	$d_э$ , мм
3	1,6...3	10	3...4
4	2...4	12	4...5
5	2...4	14	4...5
6	2...4	16	5...6
8	2...4	18	5...6

Таблица 2.2 – Рекомендуемый диаметр электродной проволоки для двусторонней сварки под флюсом без разделки кромок

Толщина металла $S$ , мм	$d_э$ , мм	Толщина металла $S$ , мм	$d_э$ , мм
14	3...4	28	5...6
16	3...4	30	5...6
18	4...5	40	5...6
20	4...5	50	5...6
24	4...5		

При выборе диаметра электродной проволоки следует дополнительно ориентироваться на допускаемую плотность тока (таблица 2.5).

Определяется сила сварочного тока, обеспечивающая требуемую глубину проплавления

$$I_{\text{св}} = 0,8 \frac{H}{K_{\Pi}} \cdot 100, \text{ А} \quad (2.3)$$

где  $K_{\Pi}$  – коэффициент пропорциональности, величина которого зависит от условий проведения сварки (см. таблица 2.6).

Таблица 2.3 – Рекомендуемый диаметр электродной проволоки для сварки под флюсом с разделкой кромок

Толщина металла S, мм	Вид разделки	d <sub>э</sub> , мм	Толщина металла S, мм	Вид разделки	d <sub>э</sub> , мм
14	V-образн.	5	22	V-образный	5...6
16	V-образн.	5	24	Односторонний	5...6
18	V-образн.	5	30	Несимметричн.	5...6
				X-образный	5...6

Таблица 2.4 – Рекомендуемый диаметр электродной проволоки для сварки в углекислом газе

Без разделки кромок										
Толщина металла S, мм	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0
d <sub>э</sub> , мм	0,5	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,2	1,6	1,6	2,0
		...	...	...	...	...	...	...	...	...
		0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	1,6	2,0	2,0	
С разделкой кромок										
Толщина металла S, мм	8,0			10,0			12,0 и более			
d <sub>э</sub> , мм	1,6...2,0			1,6...2,0			2,0			

Таблица 2.5 – Допускаемая плотность тока

d <sub>э</sub> , мм	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
j, А/мм <sup>2</sup>	90...400	65...200	45...90	35...60	30...50	25...45

В случаях, не предусмотренных таблицей 2.6, можно рассчитать сварочный ток, имея в виду, что на 1 мм глубины провара в среднем необходимо (80...100) А.

Определяется оптимальное значение напряжения на дуге

$$U_d = 20 + \frac{0,05I_{св}}{d_3^{0,5}}, \text{В} \quad (2.4)$$

Таблица 2.6 – Значения  $K_{п}$  в зависимости от условий проведения сварки

Защитная среда	Диаметр электродной проволоки $d_3$ , мм	$K_{п}$ , мм/100А		
		Переменный ток	Постоянный ток	
			Прямая полярность	Обратная полярность
Флюс ОСЦ-45	2	1,3	1,15	1,45
	3	1,15	0,95	1,3
	4	1,05	0,85	1,15
	5	0,95	0,75	1,1
	6	0,9	0,75	1,1
Флюс АН-348А	2	1,25	1,15	1,4
	3	1,1	0,95	1,25
	4	1,1	0,9	1,1
	5	0,9	0,85	1,05
	6	0,9	0,85	1,05
Углекислый газ	1,2			2,1
	1,6			1,75
	2			1,55
	3			1,45
	4			1,35
	5			1,2

Определяется скорость сварки по формуле

$$v_{св} = \frac{A}{I_{св}} \cdot 10^3, \text{ м/ч} \quad (2.5)$$

где  $A$  – коэффициент, определяемый по таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Значения коэффициента  $A$

$d_3$ , мм	1,2	1,6	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
$A$ , А/(м/ч)	2...5	5...8	8...12	2...16	16...20	0... 25	

Определяется коэффициент наплавки  $\alpha_n$ . При сварке под флюсом коэффициент наплавки ввиду незначительных потерь металла на раз-



брызгивание и угар может быть взят равным коэффициенту расплавления  $\alpha_p$ .

При сварке в среде  $\text{CO}_2$  коэффициент наплавки  $\alpha_n$  можно определить по таблице 2.8, а коэффициент потерь  $\Psi_n$  – формуле (2.6).

Таблица 2.8 – Коэффициент наплавки при сварке в среде  $\text{CO}_2$

$I_{\text{св}}, \text{A}$	$d_3, \text{мм}$			$I_{\text{св}}, \text{A}$	$d_3, \text{мм}$		
	1,6	2,0	2,5		1,6	2,0	2,5
200	14,2	12,2	–	450	24,1	19,1	–
250	15,1	12,6	–	500	28,3	22,3	17,8
300	16,5	13,5	11,1	550	–	–	20,5
350	18,6	14,8	12,4	600	–	–	24,2
400	21,1	16,8	13,9				

При сварке под флюсом низкоуглеродистыми проволоками под флюсом ОСЦ-45 и АЦ-348Л при вылете электрода, равным десяти его диаметрам, коэффициент наплавки можно определить по таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Коэффициент наплавки при сварке под флюсом

Сила тока, А	Напряжение на дуге, В	Коэффициент наплавки, г/А·ч при $d_3, \text{мм}$					
		2	3	4	5	6	8
200...270	32...34	13,4...14,6	–	–	–	–	–
280...340	34...38	14,7...15,8	–	–	–	–	–
350...390	36...40	15,9...16,0	–	–	–	–	–
400	Для $d_3 = 3...4 \text{ мм}$ 27...30 Для $d_3 = 2 \text{ мм}$ 36...40	16,4	12,3	11,5	–	–	–
500	Для $d_3 = 3...4 \text{ мм}$ 27...30 Для $d_3 = 2 \text{ мм}$ 36...40	18,5	13,8	12,6	–	–	–
700	Для $d_3 = 2 \text{ мм}$ 40...44 Для $d_3 = 3...6 \text{ мм}$ 36...38	25,0	17,0	16,0	14,3	13,8	–
800	36...38	–	18,5	17,2	15,6	14,3	–
900	36...38	–	–	–	16,3	14,8	14,4
1000	37...40	–	–	–	17,1	15,2	14,8
1100	38...45	–	–	–	–	15,7	14,9
1200	38...45	–	–	–	–	16,1	15,1

Коэффициент потерь на угар и разбрызгивание определяется по формуле:

$$\Psi_{\Pi} = -4,72 + 17,6 \cdot 10^{-2} \cdot j - 4,48 \cdot 10^{-4} \cdot j^2, \quad (2.6)$$

где  $j$  – плотность тока, А/мм<sup>2</sup>.

Определяется погонная энергия сварки

$$q_{\Pi} = \frac{I_{\text{св}} \cdot U_{\text{д}} \cdot \eta_{\text{э}}}{v_{\text{св}}}, \quad \text{Дж/см} \quad (2.7)$$

где  $I_{\text{св}}$  – ток дуги, А;

$U_{\text{д}}$  – напряжение на дуге, В;

$\eta_{\text{э}}$  – эффективный КПД сварочной дуги (при сварке под флюсом  $\eta_{\text{э}} = 0,8 \dots 0,9$ );

$v_{\text{св}}$  – скорость сварки, см/с.

Площадь наплавки за один проход

$$F_{\text{н}} = \frac{\alpha_{\text{н}} \cdot I_{\text{св}}}{\rho \cdot v_{\text{св}}}, \quad \text{см}^2, \quad (2.8)$$

где  $\alpha_{\text{н}}$  – коэффициент наплавки, г/А·ч;

$\rho$  – плотность металла, г/см<sup>3</sup>;

$v_{\text{св}}$  – скорость сварки, см/ч.

Определяют скорость подачи электродной проволоки

$$v_{\text{э}} = v_{\text{св}} \frac{F_{\text{н}}}{F_{\text{э}}}, \quad \text{м/ч} \quad (2.9)$$

где  $v_{\text{св}}$  – скорость сварки, м/ч;

$F_{\text{н}}$  – площадь наплавки, мм<sup>2</sup>;

$F_{\text{э}}$  – площадь поперечного сечения электрода, мм<sup>2</sup>.

Далее оцениваются размеры поперечного сечения зоны проплавления – глубина проплавления  $H$  и ширина шва  $B$ .

$$H = 0,0076 \sqrt{\frac{q_{\Pi}}{\Psi_{\text{пр}}}}, \quad \text{см} \quad (2.10)$$

где  $q_{п}$  – погонная энергия сварки, Дж/см;

$\psi_{пр}$  – коэффициент формы провара.

Коэффициент формы провара определяется по формуле

$$\psi_{пр} = K'(119 - 0,1 \cdot I_{св}) \frac{d_{э} \cdot U_{д}}{I_{св}}, \quad (2.11)$$

где  $K'$  – коэффициент, зависящий от рода тока и полярности.

Для плотности тока  $j < 120$  А/мм<sup>2</sup> при сварке на постоянном токе обратной полярности

$$K' = 0,367 j^{0,1925}. \quad (2.12)$$

При прямой полярности

$$K' = 0,282 j^{0,1925}. \quad (2.13)$$

При  $j > 120$  А/мм<sup>2</sup> величина  $K'$  остается неизменной (прямой полярности  $K' = 1,12$ , при обратной –  $K' = 0,92$ ).

При сварке переменным током  $K' = 1$  во всем диапазоне плотностей тока.

Определяем ширину шва

$$B = \psi_{пр} H, \text{ см} \quad (2.14)$$

По формулам (1.10...1.13), с использованием рисунка 1.4 и таблицы 1.4, определяется мгновенная скорость охлаждения  $\omega_{охл}$  зоны термического влияния при температуре наименьшей устойчивости аустенита (для большинства конструкционных сталей лежит в пределах (500...600) °С).

Полученное значение мгновенной скорости охлаждения сварного шва сравнивают с допустимыми величинами скоростей, приведенными в таблице П.4 приложения. Если скорость охлаждения окажется больше допустимой, то следует путем подбора температуры предварительного подогрева ( $T_0$ ) добиться нужной скорости охлаждения. В этом случае, если предварительный подогрев изделия перед сваркой обеспечить невозможно, следует использовать технологические приемы (сварка каскадом, горкой, блоками).

Если скорость сварки окажется меньше допустимой, следует для

получения нужной скорости охлаждения увеличить скорость сварки и повторить расчет с новой скоростью сварки.

### 2.3 Расчет режимов сварки угловых швов

Но ГОСТ 8713 и ГОСТ 14771-76 выбирается форма и конструктивные элементы подготовки кромок под сварку (рисунок 2.2). При выборе режима сварки угловых швов необходимо иметь в виду, что для исключения подрезов ширина шва не должна быть больше ширины разделки. Коэффициент формы шва не должен превышать 2.

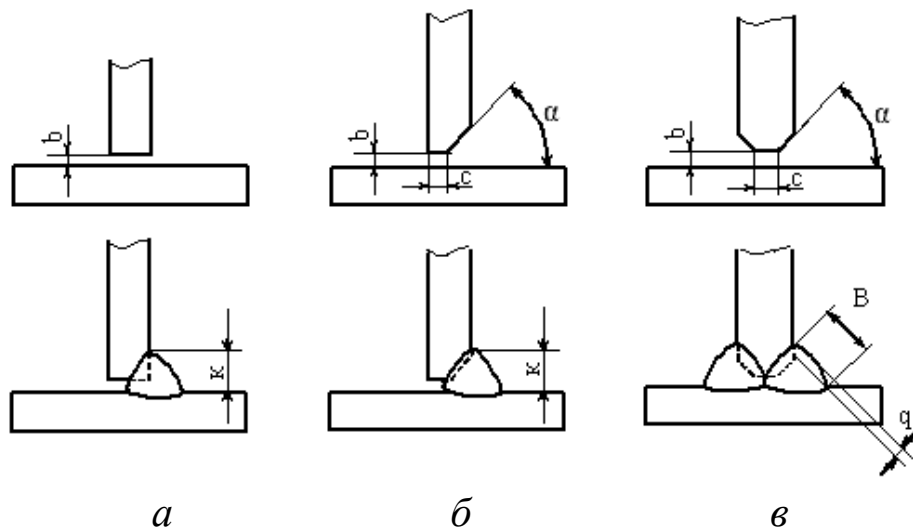


Рисунок 2.2 – Форма разделки кромок при сварке угловых швов: *a* – без разделки; *б* и *в* – с разделкой

На основании заданного значения катета шва определяется площадь поперечного сечения металла шва

$$F_n = k^2 \cdot K_y / 2, \text{ мм}^2 \quad (2.15)$$

где  $K_y$  – коэффициент увеличения, учитывающий наличие зазоров и выпуклости шва (определяется по табл. 2.10);

$k$  – катет шва.

Таблица 2.10 – Значение коэффициента увеличения  $K_y$

Катет шва, мм	3...4	5...6	7...10	12...20	20...30	30
$K_y$	1,5	1,35	1,25	1,15	1,1	1,05

Выбирается диаметр электрода  $d_э$ . При этом можно использовать рекомендации, приведенные в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Рекомендуемые диаметры электрода

Автоматическая и полуавтоматическая сварка под флюсом угловых швов металлоконструкций в «лодочку»							
Катет шва, мм	6		8		10		12
Диаметр проволоки, мм	2...4		2...5		2...5		2...5
Автоматическая и полуавтоматическая сварка углекислом газе угловых швов металлоконструкций							
Катет шва, мм	1,2...2	1,2...3	2...4	5...6	7...9	9...11	11...13
Диаметр проволоки, мм	0,6	0,8	1,2	1,6	2,0	2,0	2,0

С учетом выбранной плотности тока (таблица 2.5) определяется сила тока по формуле

$$I_{св} = \frac{\pi d_э^2}{4} \cdot j, \text{ А} \quad (2.16)$$

Напряжение на дуге рассчитывается по формуле (2.4)

Коэффициент наплавки определяется аналогично стыковым швам.

Скорость сварки рассчитывается по формуле

$$v_{св} = \frac{\alpha_n \cdot I_{св}}{\rho \cdot F_n}, \text{ м/ч} \quad (2.17)$$

Определяется скорость подачи электродной проволоки по формуле (2.9), а расчет погонной энергии сварки выполняется по формуле (2.7).

Определяют глубину проплавления  $H$

$$H = 0,0076 \sqrt{\frac{q_n}{\psi_{пр}}}, \text{ см} \quad (2.18)$$

где  $q_n$  – погонная энергия сварки, Дж/см;

$\psi_{пр}$  – коэффициент формы провара.

Коэффициент формы провара определяется по формуле 2.11.

Определяем ширину шва

$$B = \psi_{\text{пр}} H, \text{ см} \quad (2.19)$$

Оцениваем высоту выпуклости

$$q = (1,35 \dots 1,40) F_{\text{н}} / B, \text{ см} \quad (2.20)$$

Определяется общая высота шва

$$h = H + q, \text{ см} \quad (2.21)$$

Мгновенная скорость охлаждения  $ЗТВ$  при температуре наименьшей устойчивости аустенита определяется по формулам (1.10...1.13) с учетом рисунка 1.4 и таблицы 1.4 для значений поправочных коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$ . Сравнивая полученную скорость охлаждения  $\omega_{\text{охл}}$  с рекомендуемой (см. таблица П.2 приложения), при необходимости проводят корректировку режимов сварки.

## 2.6 Указания к выполнению расчета

Целью расчета является определение конструктивных и технологических параметров процесса механизированной сварки (под флюсом или в  $\text{CO}_2$ ) изделия из низколегированной стали заданной марки и толщины (таблица П.1 приложения), обеспечивающих допустимое значение мгновенной скорости охлаждения ОШЗ. Расчет ведется в следующей последовательности:

- 1) По ГОСТ 8712-79 (сварка под флюсом) или по ГОСТ 14776-76 (сварка в среде защитных газов) выбираются форма и конструктивные элементы подготовки кромок под сварку.
- 2) Задается необходимая глубина проплавления  $H$ .
- 3) Исходя из состава свариваемой стали, выбираются сварочные материалы – защитную среду (марку флюса или защитного газа), оказывающую влияние на величину сварочного тока, и марку сварочной проволоки.
- 4) Выбирается диаметр электродной проволоки.
- 5) Рассчитывается сила сварочного тока.
- 6) Определяется оптимальное значение напряжения на дуге.
- 7) Рассчитывается скорость сварки.

- 8) Определяются коэффициенты наплавки и потерь на угар и разбрызгивание.
- 9) Вычисляется погонная энергия сварки.
- 10) Определяется площадь наплавки за один проход.
- 11) Рассчитывается скорость подачи электродной проволоки.
- 12) Определяется мгновенная скорость охлаждения ЗТВ.
- 13) Полученное значение мгновенной скорости охлаждения сварного шва сопоставляется с допустимыми величинами скоростей, приведенными в таблице П.2 приложения.
- 14) Принимается решение о необходимости корректировки параметров режима.

## 2.7 Требования к оформлению отчета

При оформлении отчета по работе требуется записать:

- исходные данные к расчету (по заданию преподавателя: марка материала, его химический состав и механические свойства, толщина свариваемых деталей и тип соединения);
- привести рисунок выбранного типа подготовки кромок под сварку с необходимыми для расчетов размерами;
- порядок расчета основных технологических параметров процесса сварки;
- выводы по рассчитанному значению скорости охлаждения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оборудование и основы технологии сварки металлов плавлением и давлением: Учебное пособие / Под ред. Г.Г. Чернышова и Д.М. Шашина. – СПб.: Издательство «Лань», 2013. – 464 с.
2. Акулов А.И., Бельчук Г.А. Технология и оборудование сварки плавлением. – М.: Машиностроение, 1977. – 432 с.
3. Технология электрической сварки плавлением/Под. Ред. Б.Е. Патона// М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
4. Сильман Г.И. Конструкционные стали. – Брянск: Изд. БГИТА, 1999. – 70 с.
5. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1 – Исходные данные к выполнению практических работ

№ варианта	Марка стали	Толщина листов $s$ , мм	Способ сварки
1	20ХГНМ	12	Ручная дуговая
2	25ХГФ	20	
3	30Х	6	
4	30Х2В4МФ	16	
5	35Х2	20	
6	35ГС	8	
7	38ХГНМ	20	
8	38Х2МЮ	30	
9	40Г2Ф	16	
10	35ГС	16	
11	38ХГНМ	12	
12	38Х2МЮ	20	
13	40Г2Ф	30	
14	45ХСМ	16	
15	20ХГНМ	20	Автоматическая под слоем флюса
16	25ХГФ	30	
17	30Х	16	
18	30Х2В4МФ	20	
19	35Х2	30	



Таблица П.2 – Оптимальный интервал скоростей охлаждения при сварке сталей

Марка стали	$\Omega_{\text{охл}}$ , °C/с	$\sigma_b$ , МПа	Марка стали	$\Omega_{\text{охл}}$ , °C/с	$\sigma_b$ , МПа
Ст. 2	6...18	420	14ХГ2	1,2...5,5	898
Ст. 3 кп	1,2...12	390	10ХГ2Н	1,5...15	898
М Ст. 5 пс	0,1...20	560	10ХГ2СН	1,3...4,8	715
М Ст.5 сп	0,1...30	620	17ХГ2САФР	0,1...20	685
М.Ст.5	0,12...40	610	10ХГСНД	0,8...15	540
Б.Ст.3	1,4...15	430	15ХГСНД	1,8...9	500
35	0,12...7,0	530	40Х	4...14	941
40	2,0...4,0	730	25Г2Д	8	750
45	2,4...5,0	600-720	23Г	2,5...7,0	825
09Г2	1,0...15	570	30Г2Д	6	760
10Г2У	0,7...3,8	560	25ХГФА	20	800
10Г2Б	0,1...7,0	600	30СГНА	2...18	920
14Г2	0,1...12	640	30ХМА	0,1...10	930
18Г2	0,1...12	600	12МХ	2...100	520
16ГС	1,0...15	500	35ХМ	1...5	770
17ГС	10...30	570	20НГМ	0,8...70	980
10Г2СД	1...15	510	25Н5	0,8...70	740
10ГТ	0,1...40	500	12ХН2	0,8...50	780
14ХГС	0,8...16	500	20ХГСА	1,6...70	900
08ХГСНД	6...50	500	35ХГСА	1,5...7	980
12ХГСМФ	0,1...30	500	10Х3ГНФБ	неогранич.	1130
12ХГН	1,2...52	500	13Х3ГНВФБ	1...25	1020
15ХГН	1,3...52	670	12Х3,5ГВФБ	неогранич.	1080
12ХГНМ	2...5	640	12Х3,5ГВФБ	неогранич.	1210
15ХГНМ	1...10	640	Х5ВА	0,8...15	1060
12Х3НВФБ	неогранич.	1010	10Х4НВФБ	неогранич.	1230
15Х11МФ	1...40	650	1Х13	неогранич.	1250

Таблица П.3 – Характеристики покрытых электродов

Тип покрытия по ГОСТ 9466-75	Тип электрода по ГОСТ 9467-75	Марка электрода	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_s$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	$a_n$ , Дж/см <sup>2</sup> при температуре, °С		$\alpha_n$ , г/А·ч	Род тока и полярность	Напряжение на дуге, В	Коэф. Расхода электродов $K_э$
							-20°	-40°				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
А (кислое)	Э-42	КПЗ-32Р	470	330	22	45	100	–	8,0	±, ~	22...27	1,6
		ЦМ-7	480	360	22	56	100	40	10,6	±, ~	22...25	1,8
		ОММ-8	480	370	22	58	100	50	7,2	±	20...25	1,8
		УНЛ-1	480	–	23	–	120	100	8,0	±, ~	23...27	1,8
		ОМ-5	480	320	25	60	120	80	7,2	±, ~	23...27	1,8
Р (рутиловое)	Э-42	АНО-5	470	350	25	60	140	80	11,0	±, ~	22...28	1,6
		АНО-6	450	330	26	60	140	80	8,5	±, ~	23...27	1,7
		АНО-1	460	380	28	60	150	80	15,0	±, ~	23...27	1,7
	Э-46	РБУ-5	470	380	21	56	140	80	9,0	±, ~	23...27	1,5
		ОЗС-4	480	380	23	56	120	80	8,5	±, ~	23...27	1,7
		ЭРС-2	480	380	24	60	130	60	10,5	±, ~	23...27	1,6
		ЭРС-1	480	380	24	68	120	70	14,0	±, ~	23...27	1,6
		ОЗС-6	480	390	24	56	130	80	10,5	±, ~	23...27	1,6
		ОЗС-3	470	400	25	60	120	70	15,0	±, ~	23...27	1,6
		АНО-3	480	380	25	65	150	100	8,5	±, ~	23...27	1,6
		АНО-4	480	370	25	65	150	100	8,9	±, ~	23...27	1,7
		МР-1	480	380	25	65	150	100	8,5	±, ~	23...27	1,6
		МР-3	480	380	25	65	150	100	7,8	±, ~	23...27	1,7
РБУ-4	480	390	26	56	140	80	7,8	±, ~	23...27	1,65		

Таблица П.3 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Ц (целлю- лозное)	Э-42	ОМА-2	460	–	19	–	80	–	10,0	±, ~	20...26	1,5
		ВСП-1	470	390	25	68	130	–	10,0	±, ~	23...28	1,6
		ВСП-2	470	370	28	60	90	–	10,5	±	23...27	1,8
	Э-50	ВЦ-3	510	410	21	57	–	–	13,0	±	23...27	1,4
Б (основ- ное)	Э-42А	ОЗС-2	460	380	24	55	180	–	8,5	=	25	1,6
		УП-2/46	460	380	26	70	240	–	10,0	±, ~	23...27	1,6
		УОНИ-13/46	460	360	26	65	220	180	8,5	=	22...26	1,6
		УП-1/45	480	350	28	65	200	120	10,0	±, ~	23...27	1,8
		СМ-11	480	360	28	60	220	160	9,5	±, ~	22	1,45
	Э-46А	Э-138/45Н	470	350	22	–	150	30	8,5	±, ~	23...27	1,7
	Э-50	ВСН-3	500	–	16	–	100	30 (-70°)	9,0	±, ~	23...27	1,6
	Э-50А	К-5А	500	–	24	–	150	–	9,0	±, ~	23...27	1,7
		УОНИ-13/55	520	420	24	62	200	–	9,0	±	22...26	1,7
		УП-2/55	540	400	25	62	240	–	10,0	±, ~	23...27	1,6
		УП-1/65	540	400	25	63	240	–	10,0	±, ~	23...-27	1,6
		ДСК-50	520	–	29	–	200	140	10,0	±, ~	22	1,4
		Э-138/БОМ	510	410	24	–	160	30	9,0	=	23...27	1,7
АН-Х7		530	370	24	–	150	30	9,8	=	23...27	1,7	
Э-55	УОНИ-13/65У	570	420	22	60	–	–	9,5	=	23...27	1,6	
Э-60	УОНИ-14/65	620	470	21	65	–	–	9,5	=	23...27	1,7	

± – постоянный ток любой полярности; = – постоянный ток только обратной полярности; ~ – переменный ток