

Федеральное агентство по образованию  
Уральский государственный технический университет – УПИ  
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина

**РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА  
МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ  
ПЛАВЯЩИМ ЭЛЕКТРОДОМ**

Методические указания к курсовому и дипломному проектированию  
для студентов специальности 15.02.02 – Оборудование и технология  
сварочного производства

Екатеринбург

УГТУ-УПИ

2009

УДК 621.791.75

Составитель Р.Ф. Катаев

Научный редактор проф., д-р техн. наук М.П.Шалимов

**РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ:** методические указания к курсовому и дипломному проектированию/ Сост.: Р.Ф. Катаев. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2009. 37 с.

В указаниях изложены методы расчета основных параметров режима одно- и многопроходной, одно- и двусторонней механизированной дуговой сварки стыковых соединений, угловых соединений без разделки и с разделкой кромок в положении «в лодочку» под флюсом и в углекислом газе из условий получения заданных геометрических размеров шва, свойств сварного соединения и наивысшей производительности.

Библиогр.: 6 назв. Рис. 12. Табл. 11.

Подготовлено кафедрой «Технология сварочного производства»

© УГТУ-УПИ, 2009

## ВВЕДЕНИЕ

Использование расчетных методов определения режимов сварки, свойств металла сварных соединений, сварочных деформаций и напряжений дает наиболее полную и объективную оценку различных вариантов технологии изготовления сварных конструкций.

В настоящем методическом пособии, предназначенном для помощи студентам при курсовом и дипломном проектировании, предлагается методика расчета основных параметров режима сварки из условий получения заданных геометрических размеров шва, свойств сварного соединения и максимальной производительности, разработанная В.П. Демянцевичем [1, 2]. Методика позволяет выполнить расчет параметров режима сварки под флюсом и в углекислом газе плавящимся электродом низкоуглеродистых и низколегированных сталей толщиной не менее 8 мм для соединений, выполняемых по ГОСТ 8713-79 и ГОСТ 14771-76.

Режимом сварки называют совокупность основных характеристик (параметров) сварочного процесса, обеспечивающих получение сварных швов заданных размеров, формы и качества. Такими параметрами при дуговой сварке являются диаметр электродной проволоки ( $d_э$ ), значения величин сварочного тока ( $I_{св}$ ) и напряжения на дуге ( $U_д$ ), скорость перемещения электрода вдоль свариваемых кромок ( $V_{св}$ ), род тока и его полярность.

Размерами швов, определяющими качество и работоспособность сварного соединения, являются (рис. 1):

- глубина проплавления –  $h$ ;
- ширина шва –  $e$ ;
- высота валика –  $g$ .

Отношение ширины шва  $e$  к глубине проплавления  $h$  называют коэффициентом формы проплавления ( $\varphi_{пр}$ ):

$$\varphi_{пр} = \frac{e}{h}.$$

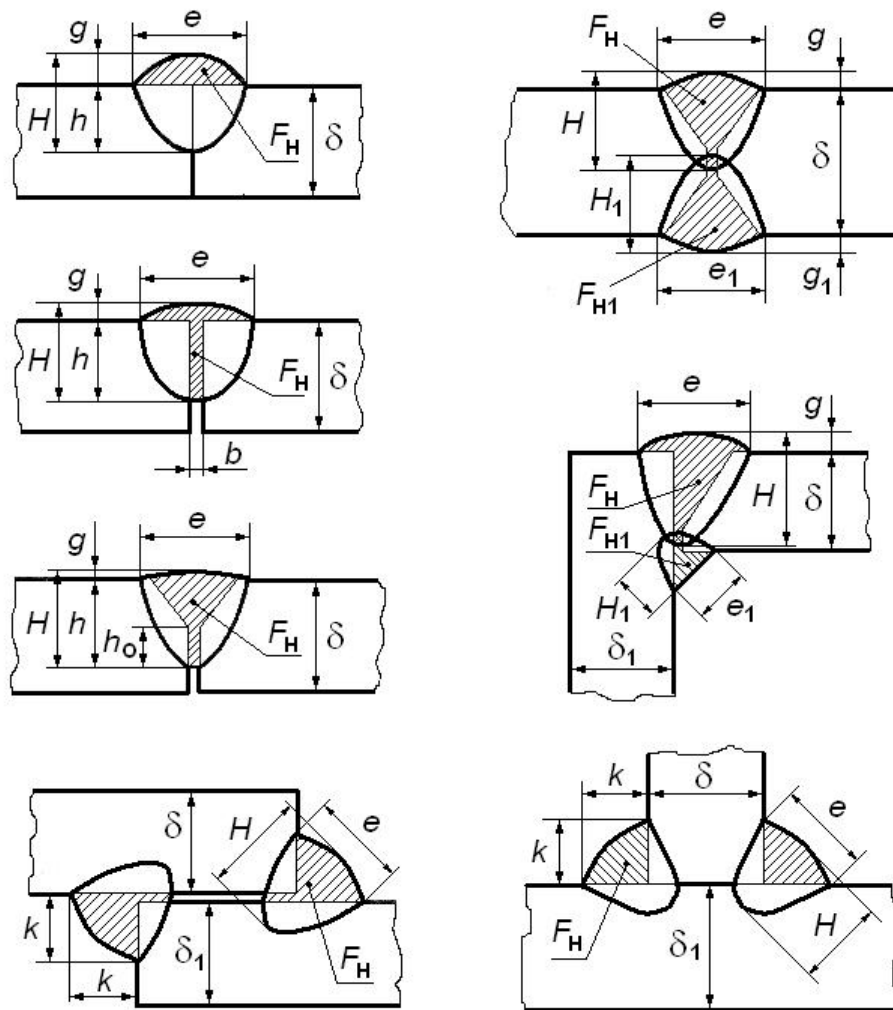


Рис. 1. Исходные геометрические размеры сварных швов при расчете основных параметров режима сварки

Для механизированной сварки стыковых швов значения  $\varphi_{пр}$  должны находиться в интервале 0,8...4,0. Швы с коэффициентом проплавления, близким к нижнему пределу, следует избегать, так как они склонны к образованию горячих трещин. Большим значениям этого коэффициента соответствуют широкие швы с малой глубиной проплавления, что нерационально с точки зрения использования теплоты дуги и приводит к повышенным деформациям, поэтому оптимальным следует считать более узкий интервал – 1,0...2,5.

Отношение ширины шва  $e$  к высоте валика  $g$  называют коэффициентом формы усиления или коэффициентом формы валика ( $\varphi_B$ ):

$$\varphi_B = \frac{e}{g}.$$

Значения  $\phi_B$  для хорошо сформированных швов не должны выходить за пределы 7...10. Малые значения  $\phi_B$  имеют место при узких и высоких швах с резким переходом от основного металла к металлу шва. Такие швы обладают неудовлетворительной работоспособностью при переменных нагрузках из-за концентрации напряжений в местах перехода от основного металла к шву, которые могут быть причиной появления усталостных трещин. Если в результате подсчета оказывается, что  $\phi_B < 7$ , то необходимо делать разделку кромок, чтобы убрать в нее часть наплавленного металла.

Большие значения  $\phi_B$  соответствуют широким и низким усилениям. В этом случае излишне расплавляется основной металл. Кроме того, вследствие колебаний уровня жидкого металла ванны возможны местные уменьшения сечения шва и на отдельных участках сечение шва может оказаться меньше сечения основного металла.

Согласно экспериментальным данным [2] профиль провара при одном режиме сварки остается практически неизменным независимо от типа шва. Тип шва, зазоры или разделка влияют главным образом на соотношение долей основного и наплавленного металла, а контур провара во всех случаях практически одинаков (рис. 2).

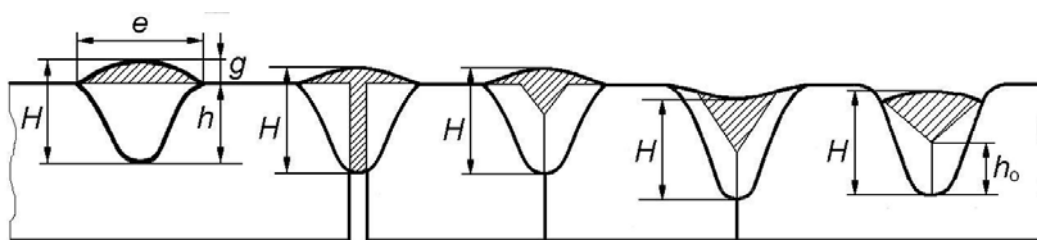


Рис. 2. Профиль провара при различных типах подготовки кромок

Во всех случаях при неизменном режиме общая высота шва остается постоянной как при наплавке, так и при сварке в стык без разделки и с разделкой кромок:

$$H = h + g = h_1 + g_1 = h_2 + g_2 = h_3 + g_3 = \dots$$

Поэтому соотношения между основными размерами шва, определенные для наплавки или сварки в стык без зазора и разделки, могут быть пересчитаны, если

на этом же режиме сваривается соединение в стык с разделкой кромок или с зазором.

Допустим, что при сварке на заданном режиме стыкового шва без зазора (или при наплавке) (рис. 3, а) известны  $h$ ,  $e$ ,  $g$  и  $F_H$ . Для рассчитываемого шва известны размеры разделки (глубина  $f$  и угол разделки  $\alpha$  (рис. 3, б). Пересчет производится следующим образом.

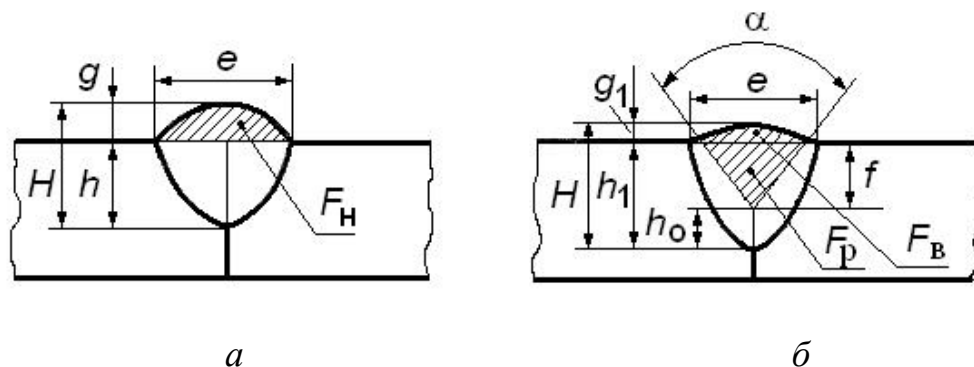


Рис. 3. Размеры швов, выполненных на одном режиме при сварке без зазора и разделки (а) и при сварке в разделку (б)

Определяют площадь разделки рассчитываемого шва по формуле

$$F_p = f^2 \operatorname{tg} \alpha / 2.$$

Тогда площадь валика при сварке с разделкой будет  $F_B = F_H - F_p$ .

Зная площадь валика  $F_B$ , можно определить его высоту по эмпирической зависимости

$$g_1 = (1,35 \dots 1,40) F_B / e.$$

Имея ввиду, что  $H = \text{const}$ , можно определить и фактическую глубину проплавления при сварке с разделкой:

$$h_1 = H - g_1.$$

При сварке стыковых швов с разделкой кромок и угловых швов величину проплавления нескошенной части называют глубиной проплавления притупления  $h_0$ .

Чтобы рассчитать режим сварки, обеспечивающий заданные размеры и форму шва, а также внести коррективы в режимы сварки, если это потребуется, необходимо установить связь между отдельными параметрами режима и разме-

рами шва. Основное влияние на размеры и форму шва оказывают количество теплоты, вводимое в металл, и условия ввода этой теплоты в изделие.

Увеличение сварочного тока приводит к возрастанию мощности дуги, что обеспечивает повышение количества расплавленного металла как электродного, так и основного. Следствием этого является увеличение глубины проплавления, высоты валика и ширины шва. При этом преобладает увеличение проплавляющей способности дуги благодаря значительному возрастанию давления дуги на сварочную ванну. Ширина шва при этом увеличивается незначительно.

Увеличение напряжения на дуге также приводит к увеличению тепловой мощности дуги. Но увеличение подвижности дуги, обусловленной увеличением её длины, вызывает, прежде всего, увеличение ширины шва и уменьшение высоты валика..

Увеличение скорости сварки вызывает уменьшение ширины проплавления и некоторое уменьшение высоты валика. Характер влияния скорости сварки на глубину проплавления в разных диапазонах скоростей различен.

При неизменной мощности дуги и скорости сварки влияние на размеры и форму шва оказывает диаметр электрода. Уменьшение диаметра электрода обеспечивает более концентрированный ввод тепла, в результате чего в некоторых пределах увеличивается глубина проплавления и высота валика, а ширина шва уменьшается.

В методических указаниях даны алгоритмы расчета режимов для одно- и многопроходной, одно- и двусторонней сварки стыковых и угловых соединений без разделки и с разделкой в положении «в лодочку». Для повышения точности расчетов, увеличения их скорости и значительного сокращения рутинных расчетных операций их следует выполнять с использованием ЭВМ. При этом появляется возможность проведения расчета значительного числа вариантов с целью выбора оптимального.

Исходными данными для расчета являются: марка стали, толщина свариваемых деталей, тип соединения, геометрические размеры шва, способ сварки, род и полярность тока.

# 1. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ОДНОПРОХОДНОЙ ОДНО – И ДВУСТОРОННЕЙ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ

1.1. На миллиметровой бумаге в натуральную величину или в определенном масштабе вычерчивают сварное соединение, для выполнения которого рассчитываются режимы сварки. На чертеж наносят контуры сечения шва и свариваемых кромок в соответствии с действующими ГОСТами, заводскими или отраслевыми стандартами, ТУ.

По чертежу определяют геометрические параметры шва: его ширину  $e$ , глубину проплавления  $h$ , высоту усиления  $g$ , высоту шва  $H$  в мм и площадь наплавленного металла  $F_H$  в мм<sup>2</sup>.

При выполнении двустороннего симметричного шва (рис. 4, а) достаточно рассчитать параметры режима сварки с одной стороны. Шов с обратной стороны выполняется на этом же режиме. При двусторонней сварке швов, отличающихся геометрическими размерами (рис. 4, б), расчет режимов выполняется для каждого шва.

Для гарантированного проплавления при двусторонней однопроходной сварке необходимо, чтобы размеры швов удовлетворяли условию  $h_1+h_2=\delta+k$ , где  $k$  – величина перекрытия швов (рис. 4).

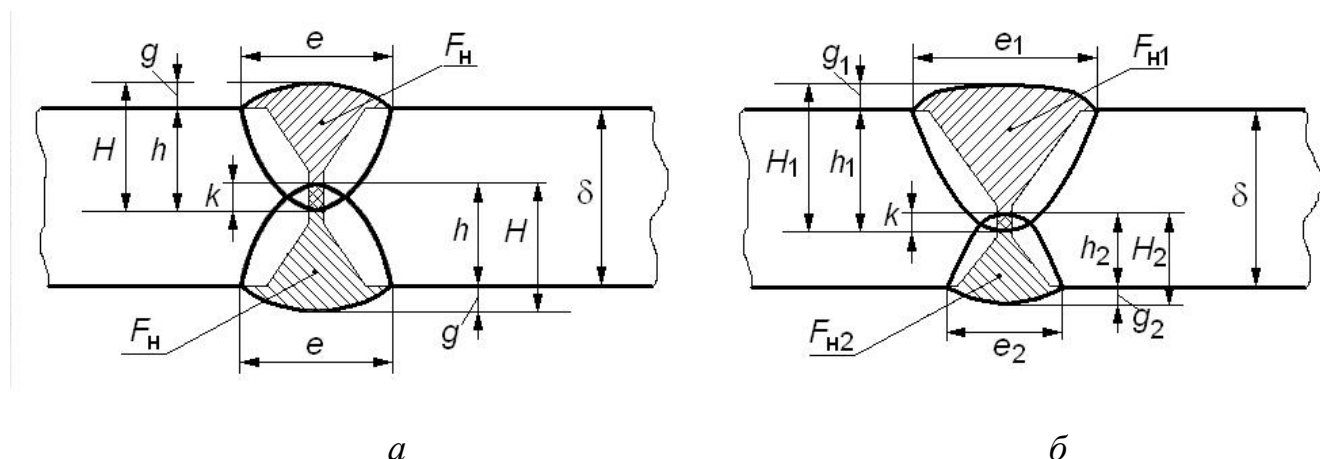


Рис. 4. Сечение стыкового двустороннего шва с разделкой кромок

1.2. Определяют величину сварочного тока исходя из необходимой глубины проплавления:

$$I_{св} = (80...100)h_p, \quad \frac{A_s}{8} \quad (1.1)$$



где  $h_p$  – расчетная глубина проплавления, мм.

При односторонней сварке в один проход принимают  $h_p = \delta$ , где  $\delta$  – толщина свариваемого металла. При двусторонней односторонней сварке симметричным швом  $h_p = (0,6 \dots 0,7)\delta$  для гарантированного перекрытия швов.

При сварке соединений, собранных с гарантированным зазором, с разделкой кромок или с зазором и разделкой одновременно, расчетную глубину проплавления определяют по формуле

$$h_p = H - \frac{F_H}{0,73 \cdot e}, \text{ мм.} \quad (1.2)$$

Величину сварочного тока, обеспечивающую заданную глубину проплавления, можно рассчитать и по другой зависимости

$$I_{св} = \frac{h_p}{k_h} 100, \text{ А,} \quad (1.3)$$

где  $k_h$  – коэффициент пропорциональности, величина которого зависит от условий проведения сварки.

Значения коэффициента  $k_h$ , характерные для средних значений тока при механизированной сварке проволокой данного диаметра под кислыми высокомарганцовистыми флюсами и в углекислом газе, приведены в табл. 1 [1].

1.3. Выбирают диаметр электродной проволоки. Ориентировочно диаметр электродной проволоки может быть выбран по табл. 2, 3 [2] или рассчитан по формуле

$$d_s = 1,13 \sqrt{\frac{I_{св}}{j}}, \text{ мм,} \quad (1.4)$$

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

При выборе диаметра сварочной проволоки для сварки в углекислом газе следует обращать внимание на наличие диапазонов сварочного тока, в которых сварку выполнять не рекомендуется. Эти диапазоны (табл. 3) характерны повышенным разбрызгиванием (до 25 %) из-за смешанного переноса электродного металла.

Таблица 1

Значения  $k_h$  в зависимости от условий проведения сварки

Марка флюса или защитный газ	$d_э$ , мм	$k_h$ , мм/А			Марка флюса или защитный газ	$d_э$ , мм	$k_h$ , мм/А		
		переменный ток	постоянный ток				переменный ток	постоянный ток	
			прямая полярность	обратная полярность				прямая полярность	обратная полярность
ОСЦ-45	2	1,30	1,15	1,45	АН-348А	5	0,95	0,85	1,05
	3	1,15	0,95	1,30		6	0,90	-	-
	4	1,05	0,85	1,15	Углекислый газ	1,2	-	-	2,10
	5	0,95	0,75	1,10		1,6	-	-	1,75
	6	0,90	-	-		2,0	-	-	1,55
						3,0	-	-	1,45
АН-348А	2	1,25	1,15	1,40	4,0	-	-	1,35	
	3	1,10	0,95	1,25	5,0	-	-	1,20	
	4	1,00	0,90	1,10					

Таблица 2

Допускаемые плотности тока и диапазоны сварочного тока при сварке стыковых швов под флюсом

Диаметр электрода, мм	2	3	4	5	6
Плотность тока, А/мм <sup>2</sup>	65...200	45...90	35...60	30...50	25...45
Сварочный ток, А	200...600	300...700	400...800	600...1000	700...1200

Таблица 3

Допускаемые плотности тока и диапазоны сварочного тока при сварке стыковых швов в углекислом газе

Диаметр электрода, мм	1,2	1,6	2,0	3,0
Плотность тока, А / мм <sup>2</sup>	88...195 310...440	90...160 200...350	60...140 160...240	45...70 78...110
Сварочный ток, А	100...220 350...500	180...320 400...700	200...450 500...750	300...500 550...800

1.4. Уточняют плотность тока

$$j = \frac{4I_{св}}{\pi d_э^2}, \text{ А/мм}^2. \quad (1.5)$$

1.5. Рассчитывают напряжение на дуге

$$U_d = 20 + \frac{0,05I_{св}}{\sqrt{d_э}}, \text{ В.} \quad (1.6)$$

### 1.6. Устанавливают скорость сварки

$$V_{\text{св}} = A / I_{\text{св}}, \text{ м/ч}, \quad (1.7)$$

где коэффициент  $A$  ( $A \cdot \text{м/ч}$ ) выбирают в зависимости от диаметра электродной проволоки из табл. 4 [1, 2].

Таблица 4

$d_3$ , мм	$A$ , $A \cdot \text{м/ч}$	$d_3$ , мм	$A$ , $A \cdot \text{м/ч}$
1,2	$(2...5)10^3$	4,0	$(16...20)10^3$
1,6	$(5...8)10^3$	5,0	$(20...25)10^3$
2,0	$(8...12)10^3$	6,0	$(25...30)10^3$
3,0	$(12...16)10^3$		

### 1.7. Выбирают вылет электрода – $l_3$ .

При сварке под флюсом  $l_3 = 10d_3$ , мм. (1.8)

При сварке в  $\text{CO}_2$ : при  $d_3$  меньше 2 мм  $l_3 = 15...20$  мм,

при  $d_3$  больше 2 мм  $l_3 = 20...25$  мм.

После расчета основных параметров режима сварки проверяют правильность их выбора (разд. 2). Если глубина проплавления и другие параметры шва удовлетворяют поставленным требованиям, то расчет завершается определением скорости подачи проволоки и расхода углекислого газа в случае сварки в  $\text{CO}_2$  либо грануляции и высоты слоя флюса при сварке под флюсом. В противном случае проводят корректировку режима.

### 1.8. Ориентировочно определяют скорость подачи электродной проволоки

$$V_{\text{пп}} = \frac{V_{\text{св}} F'_n (1 + 0,01\psi) 4}{\pi d_3^2}, \text{ м/ч}, \quad (1.9)$$

где  $F'_n$  – площадь сечения металла, наплавленного на выбранном режиме,  $\text{мм}^2$ ,

$\psi$  – коэффициент потерь металла, %,

$V_{\text{св}}$  – скорость сварки, м/ч,

$d_3$  – диаметр электродной проволоки, мм.

### 1.9. Ориентировочно определяют расход углекислого газа при сварке в $\text{CO}_2$

$$Q_{\text{г}} = 10 + \frac{(I_{\text{св}} - 30)}{51,3}, \text{ л/мин.} \quad (1.10)$$

При сварке под флюсом по табл. 5 выбирают высоту слоя флюса и грануляцию его частиц.

Таблица 5

Рекомендуемая высота слоя флюса и грануляция частиц при сварке под флюсом

Сварочный ток, А	200	400	600	800	1000	1200
Высота слоя, мм	25...35	25...35	35...40	35...40	45...60	45...60
Грануляция частиц, мм	0,25...1,60			0,40...2,50		

## 2. РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ШВА, ВЫПОЛНЕННОГО НА ВЫБРАННОМ РЕЖИМЕ СВАРКИ

Расчет геометрических размеров шва на выбранных режимах выполняется для сравнения их с заданными параметрами шва. Расчет выполняется в следующей последовательности.

2.1. Рассчитывают величину погонной энергии сварки:

$$q_{\text{п}} = 36 \cdot I_{\text{св}} U_{\text{д}} \eta_{\text{э}} / V_{\text{св}}, \text{ Дж/см}, \quad (2.1)$$

где  $V_{\text{св}}$  — скорость сварки, м/ч,

$\eta_{\text{э}}$  — эффективный КПД нагрева изделия дугой.

Для сварки под флюсом значение эффективного КПД принимают равным (0,8—0,85), для сварки в  $\text{CO}_2$  — (0,7 — 0,75).

2.2. Рассчитывают коэффициент формы проплавления:

$$\varphi_{\text{пр}} = \kappa' (19 - 0,01 \cdot I_{\text{св}}) \frac{d_{\text{э}} U_{\text{д}}}{I_{\text{св}}}, \quad (2.2)$$

где коэффициент  $\kappa' = 1$  при сварке переменным током во всех диапазонах плотностей тока.

При плотностях тока меньше  $120 \text{ А/мм}^2$  и сварке на постоянном токе обратной полярности

$$\kappa' = 0,367 \cdot j^{0,1925},$$

на прямой полярности

$$\kappa' = 2,82 / j^{0,1925}.$$

При плотностях тока, равных или больше  $120 \text{ А/мм}^2$ , и сварке на постоянном токе обратной полярности  $k' = 0,92$ ; на прямой полярности  $k' = 1,12$ .

2.3. Определяют глубину проплавления на выбранных выше параметрах режима сварки:

$$\text{при сварке под флюсом} \quad h'_p = 0,076 \sqrt{q_{\text{п}} / \varphi_{\text{пр}}}, \text{ мм}; \quad (2.3)$$

$$\text{при сварке в } \text{CO}_2 \quad h'_p = 0,081 \sqrt{q_{\text{п}} / \varphi_{\text{пр}}}, \text{ мм}, \quad (2.4)$$

где  $q_{\text{п}}$  – погонная энергия сварки, Дж/см.

2.4. Рассчитывают ширину шва:

$$e' = h'_p \cdot \varphi_{\text{пр}}, \text{ мм}. \quad (2.5)$$

Полученные значения глубины проплавления и ширины шва сравнивают с исходными значениями ширины шва (из чертежа) и расчетной глубины проплавления. Ошибка не должна превышать 5 %. В противном случае необходимо ввести коррекцию выбранных значений основных параметров режима сварки с учетом их влияния на геометрию шва и вновь выполнить проверку в соответствии с п.п. 2.1–2.4.

2.5. Определяют коэффициент расплавления.

При расчете режимов сварки без использования вычислительной техники для сокращения расчетных операций величина коэффициента расплавления ориентировочно может быть установлена по экспериментальным данным [2], представленным на рис. 5.

2.6. Рассчитывают коэффициент наплавки.

Величина коэффициента наплавки связана с величиной коэффициента расплавления следующим соотношением:

$$\alpha_{\text{н}} = \alpha_{\text{р}}(1 - \psi \cdot 0,01), \quad (2.6)$$

где  $\psi$  – коэффициент потерь на угар и разбрызгивание, %.

При сварке под флюсом ввиду незначительных потерь можно принять  $\psi = 0$ , то есть  $\alpha_{\text{н}} = \alpha_{\text{р}}$ .

При сварке в углекислом газе в диапазоне плотностей тока 60...320 А/мм<sup>2</sup> ожидаемую среднюю величину коэффициента потерь можно рассчитать по формуле

$$\psi = - 4,72 + 17,6 \cdot 10^{-2} j - 4,48 \cdot 10^{-4} j^2. \quad (2.7)$$

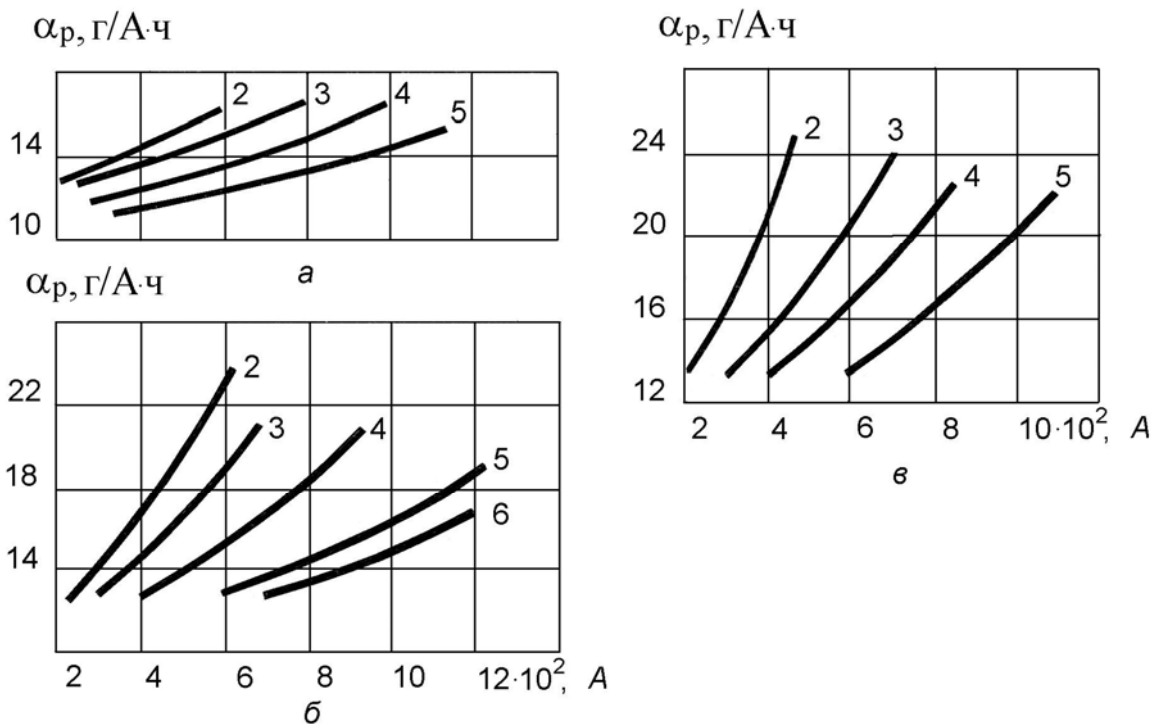


Рис. 5. Зависимость  $\alpha_p$  от режима сварки:  
 а – постоянный ток обратной полярности; б – переменный ток; в – постоянный ток прямой полярности; 2...6 диаметры электродной проволоки, мм

2.7. Определяют площадь сечения наплавленного металла:

$$F'_H = \frac{\alpha_H I_{CB}}{\gamma \cdot V_{CB}}, \text{ мм}^2, \quad (2.8)$$

где  $\gamma$  – плотность электродной проволоки, г/см<sup>3</sup>,

$V_{CB}$  – скорость сварки, м/ч,

$\alpha_H$  – коэффициент наплавки, г/А·ч.

При сварке с гарантированным зазором или в разделку расчетное значение  $F'_H$  сравнивают с исходным  $F_H$ . Если расхождение превышает 10 %, выполняется коррекция выбранных значений основных параметров режима сварки. Затем снова выполняют проверку в соответствии с п.п. 2.1–2.4.

2.8.. При сварке встык без зазора и без скоса кромок необходима проверка коэффициента формы валика. Для этого сначала рассчитывают высоту усиления

$$g' = \frac{1,375 \cdot F'_H}{e'}, \text{ мм}, \quad (2.9)$$

а затем коэффициент формы валика

$$\varphi_B = e'/g'. \quad (2.10)$$

Значение этого коэффициента должно быть не менее 7. При  $\varphi_B$  менее 7 необходимо провести корректировку режима сварки, если это возможно, или же предусмотреть разделку кромок (рис. 6) или зазор (рис. 7).

2.8.1. Расчет размеров разделки:

- задают коэффициент формы валика —  $\varphi'_B$ ,
- рассчитывают площадь сечения такого валика

$$F_B = \frac{0,73 \cdot (e')^2}{\varphi'_B}, \text{ мм}^2, \quad (2.11)$$

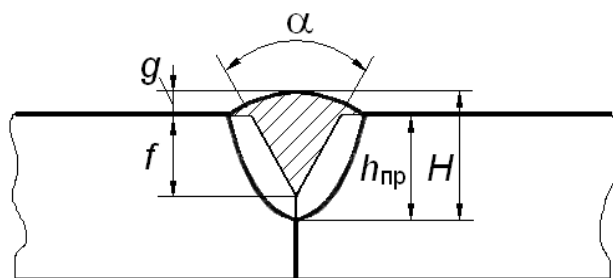


Рис. 6. Сечение шва при сварке стыкового соединения с разделкой кромок

- определяют необходимую площадь разделки, чтобы туда поместить часть наплавленного металла

$$F_p = F'_H - F_B, \text{ мм}^2, \quad (2.12)$$

- выбирают угол разделки. Обычно принимают  $\alpha = 50...60^\circ$ ,
- определяют глубину разделки

$$f = \sqrt{\frac{F_p}{\text{tg} \frac{\alpha}{2}}}, \text{ мм}, \quad (2.13)$$

- определяют высоту валика

$$g'' = \frac{e'}{\varphi_B}, \text{ мм}, \quad (2.14)$$

– рассчитывают окончательную глубину проплавления

$$h_{\text{пр}} = H - g'', \text{ мм}, \quad (2.15)$$

где  $H = h_p' + g'$ .

Если глубина разделки  $f$  принимается отличной от расчетной (например, 7,0 вместо 6,7), рассчитывают действительные значения  $F_p'$ ,  $F_B'$ ,  $g'''$ ,  $\varphi_B''$ ,  $h_{\text{пр}}'$  по формулам (2.16, 2.17, 2.9, 2.10, 2.15):

$$F_p' = f^2 \cdot \text{tg}\alpha / 2; \quad (2.16) \quad F_B' = F_H' - F_p'; \quad (2.17)$$

$$g''' = \frac{1,375 \cdot F_B'}{e'}; \quad \varphi_B'' = \frac{e'}{g'''}; \quad h_{\text{пр}}' = H - g'''.$$

2.8.2. Расчет величины зазора (рис.7):

- задают коэффициент формы валика —  $\varphi_B'$ ;
- рассчитывают площадь сечения  $F_B'$  такого валика по формуле 2.11;
- по формуле 2.14 рассчитывают высоту валика  $g''$ ;
- определяют величину зазора  $b$

$$b = \frac{F_H' - F_B'}{H - g''}, \text{ мм}. \quad (2.18)$$

– по формуле 2.15 определяют окончательную глубину проплавления  $h_{\text{пр}}$ .

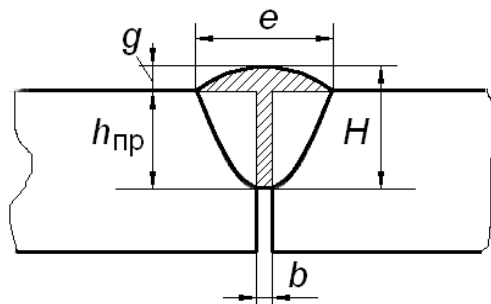


Рис.7. Сечение шва при сварке стыкового соединения с заданным зазором

Если величина зазора с целью округления принимается отличной от расчетной, уточняют значение  $F_B'$ :

$$F_B' = \frac{(F_H' - Hb)e'}{(e' - 1,375b)}, \text{ мм}^2. \quad (2.19)$$

Затем по формулам 2.9, 2.10 и 2.15 рассчитывают  $g'''$ ,  $\varphi_B''$ ,  $h_{\text{пр}}'$ .



При двусторонней сварке расчет швов, если они отличаются геометрическими размерами, производится отдельно.

### 3. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ СТЫКОВЫХ МНОГОПРОХОДНЫХ ШВОВ

Расчет режима сварки стыковых многопроходных швов выполняется в два этапа.

*Первый этап* — расчет режима сварки первого слоя шва. При расчете режима первого слоя шва прежде всего определяют режим сварки, обеспечивающий заданную величину проплавления притупления (рис. 8).

*Второй этап* — определение режима сварки второго и последующих проходов, которые позволили бы произвести заполнение разделки при хорошем формировании шва.

#### 3.1. Порядок расчета параметров режима сварки первого слоя шва

3.1.1. Выбирают диаметр электродной проволоки в зависимости от оборудования и способа сварки.

3.1.2. В зависимости от выбранного диаметра электродной проволоки назначают силу сварочного тока. Установлено, что первый слой шва не имеет горячих трещин, если плотность тока не превышает величин, указанных в табл. 6 [2].

Таблица 6

Рекомендуемые плотности тока при выполнении первого шва

$d_э$ , мм	2	4	5	6
$j$ , А/мм <sup>2</sup>	160	55	50	42

3.1.3. Затем по известным формулам, так же как и для стыковых однопроходных швов, рассчитывают:

- напряжение на дуге, В (формула 1.6);
- скорость сварки, м/ч (формула 1.7);
- вылет электрода, мм (формула 1.8);
- величину погонной энергии, Дж/см (формула 2.1);

- коэффициент формы проплавления (формула 2.2);
- глубину проплавления, мм (формула 2.3 или 2,4);
- ширину шва, мм (формула 2.5);
- коэффициент расплавления, г/А ч, выбирают по экспериментальным зависимостям (рис. 5);
- коэффициент наплавки, г/А ч, (формула 2.6);
- площадь сечения наплавленного металла, мм<sup>2</sup> (формула 2.8);
- высоту валика, мм (формула 2.9).

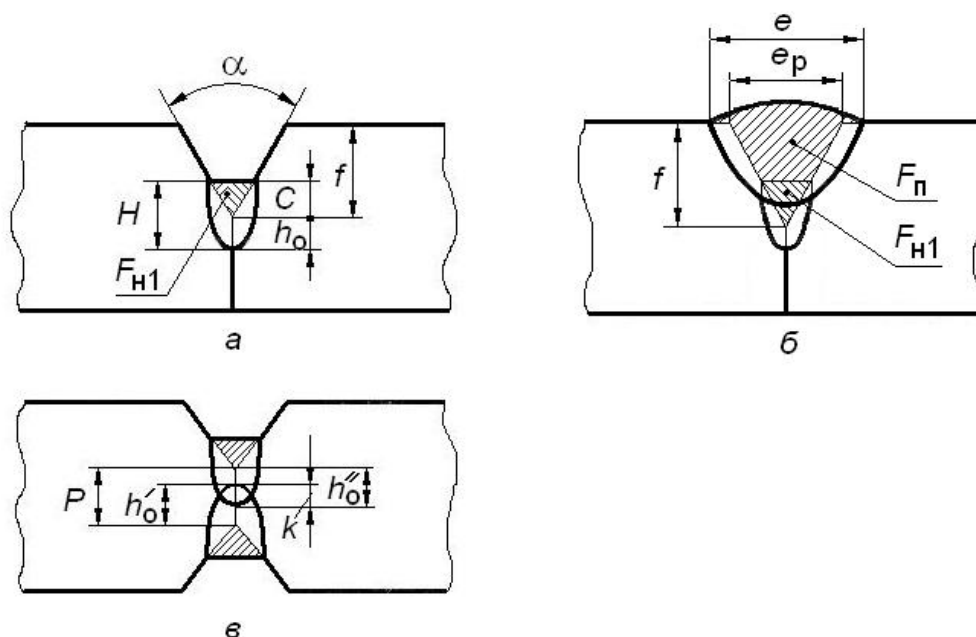


Рис.8. Поперечное сечение стыкового многопроходного шва:  
*a* – первый проход; *б* – первый и второй (последующие) проходы;  
*в* – первые проходы двухстороннего шва

3.1.4. Определяют общую высоту шва

$$H = h'_p + g', \text{ мм.}$$

3.1.5. Определяют высоту заполнения разделки

$$C = \sqrt{\frac{F_{H1} - Hb}{\text{tg}\alpha/2}}, \text{ мм,} \quad (3.1)$$

где  $F_{H1}$  – площадь сечения наплавленного металла первого шва, мм<sup>2</sup>;

$b$  – величина зазора, мм.

3.1.6. Рассчитывают глубину проплавления притупления

$$h_o = H - C, \text{ мм.} \quad (3.2)$$

Если необходимо, режим корректируют.

3.1.7. Рассчитывают скорость подачи проволоки, расход защитного газа или толщину слоя флюса.

### 3.2. Порядок расчета режимов сварки последующих проходов

Расчет режимов сварки последующих проходов производят исходя из необходимости заполнения разделки.

3.2.1. Определяют общую площадь разделки

$$F_p = f^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha / 2 + f \cdot b, \text{ мм}^2. \quad (3.3)$$

3.2.2. Задают коэффициент формы валика.

3.2.3. Рассчитывают площадь валика, обеспечивающую желаемый коэффициент формы усиления

$$F_b = \frac{0,73 \cdot e^2}{\varphi_b}, \text{ мм}^2. \quad (3.4)$$

Ширина шва «e» должна перекрывать ширину разделки не менее чем на 2—3 мм на сторону, т. е.:

$$e = 2f \operatorname{tg} \alpha / 2 + (2 \dots 3) \cdot 2 + b, \text{ мм}. \quad (3.5)$$

3.2.4. Определяют общую площадь наплавки:

$$F_n = F_p + F_b, \text{ мм}^2. \quad (3.6)$$

3.2.5. Рассчитывают часть сечения шва, которая должна быть заполнена при последующих проходах:

$$F_{\Pi} = F_n - F_{\text{н1}}, \text{ мм}^2. \quad (3.7)$$

Выбор режима сварки для последующих проходов осуществляется в зависимости от  $F_{\Pi}$ . Если  $F_{\Pi}$  близка по значению к  $F_{\text{н1}}$ , то сварку завершают вторым проходом. В противном случае рассчитывают режим и количество проходов.

3.2.6. По уже известным зависимостям и рекомендациям определяют режимы последующих проходов:

— диаметр электродной проволоки, мм;

— величину сварочного тока по формуле  $I_{\text{св}} = \frac{\pi d^2 j}{4}$ , А или по табл.2 или 3;

— напряжение на дуге, В (формула 1.6);

— скорость сварки, м/ч (формула 1.7);

— вылет электрода, мм (формула 1.8);

—коэффициенты расплавления и наплавки, г/А·ч (формула 2.6);

—площадь сечения наплавленного металла ( $F_{\text{нп}}$ ), мм<sup>2</sup> (формула 2.8).

3.2.7. Устанавливают необходимое количество проходов:

$$n = F_{\text{п}} / F_{\text{нп}} . \quad (3.8)$$

3.2.8. Если же сварку завершают вторым проходом, то необходимо выполнить сечение второго прохода равным  $F_{\text{п}}$ . Для этого скорость сварки рассчитывают из сечения наплавленного металла:

$$V_{\text{св}} = \frac{\alpha_{\text{н}} \cdot I_{\text{св}}}{\gamma F_{\text{п}}} , \text{ м/ч.} \quad (3.9)$$

Чтобы установить пригодность режима сварки второго прохода, необходимо проверить, будет ли перекрыта разделка по ширине. Для этого определяют фактическую ширину шва, получаемого при втором проходе:

— рассчитывают величину погонной энергии, Дж/см, (формула 2.1);

— рассчитывают коэффициент формы проплавления и глубину проплавления (формулы 2.2, 2.3 или 2.4),

— определяют ширину шва, мм. (формула 2.5).

Фактическая ширина шва не должна быть меньше желаемой.

3.2.9. При многопроходной сварке фактическая ширина шва последующих проходов тоже рассчитывается, чтобы определить, сколькими проходами наложить последний слой.

Если  $e' \geq e$ , последний слой формируется одним проходом.

Если же  $e' \leq e$ , то последний слой формируется по крайней мере за два прохода.

При назначении режима сварки завершающих проходов необходимо режим сварки выбирать таким образом, чтобы получить хорошо сформированные швы с плавным переходом от основного металла к металлу шва. Это достигается путем применения электродной проволоки большого диаметра (5...6 мм) и сравнительно небольшой плотности тока в электроде.

При расчете режимов первых проходов при двусторонней сварке стыкового шва должно быть выполнено следующее условие (рис. 8, в):

$$h'_0 + h''_0 = P + k, \quad (3.10)$$

где  $h'_0$  – глубина проплавления притупления от первого прохода с первой стороны, мм,

$h''_0$  – глубина проплавления притупления от первого прохода с другой стороны, мм,

$P$  – величина притупления, мм,

$k$  – величина перекрытия швов, мм.

Расчет режима сварки завершают определением скорости подачи проволоки и расхода защитного газа либо толщины слоя флюса и его грануляции для каждого режима.

#### **4. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ДУГОВОЙ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ УГЛОВЫХ ШВОВ**

При механизированной дуговой сварке угловые швы сваривают двумя способами:

- в положении «в лодочку» электродом, расположенным вертикально;
- в нижнем положении наклонным электродом.

Угловые швы, т. е. швы тавровых, угловых и нахлесточных соединений, свариваемые в положении «в лодочку», с некоторым приближением можно рассматривать как стыковые с углом разделки  $90^\circ$  (рис. 9).

Режим сварки угловых швов необходимо выбирать с учетом специфических особенностей их формирования. При получении плоских или выпуклых швов ширина шва всегда должна быть равна расстоянию по горизонтали между свариваемыми деталями. Если ширина шва будет больше этого расстояния, то неизбежны подрезы. Поэтому коэффициент формы проплавления для таких соединений, равный отношению ширины шва к общей его высоте ( $\varphi_{пр} = e/H$ ), должен быть не больше двух.

Вместе с этим слишком глубокие и узкие швы склонны к образованию горячих трещин из-за неблагоприятных условий кристаллизации. Практикой установлено, что угловые швы формируются удовлетворительно на режимах, при которых плотность тока в электроде находится в пределах, указанных в табл. 7 [2].

Таблица 7

Допускаемые плотности и диапазоны сварочного тока при сварке угловых швов

Диаметр электрода, мм	2	3	4	5
Плотность тока, А/мм <sup>2</sup>	60...150	50...85	35...60	30...40
Сварочный ток, А	190...470	350...600	440...810	590...780

При выборе диаметра электродной проволоки следует учитывать, что угловые швы с малым катетом можно получить лишь при использовании электродной проволоки малого диаметра. Сварка проволокой диаметром более 5 мм не обеспечивает необходимого проплавления вершины углового шва и поэтому практического применения не находит. Максимальный катет углового шва, который можно получить за один проход, практически не зависит от диаметра электродной проволоки и равен 10 мм, поэтому проволока диаметром 2 мм наиболее универсальна. При сварке угловых швов с большими катетами (8–10 мм) несколько большую производительность можно получить при использовании электродной проволоки диаметром 4–5 мм. В табл. 8 даны рекомендуемые диаметры электродной проволоки.

Таблица 8

Рекомендуемые диаметры электродной проволоки при сварке угловых швов

Катет шва, мм	3...4	5...7	8...10
Диаметр электр., мм	2	2-3(4)	2-5

#### **4.1. Порядок расчета режима сварки угловых швов без разделки кромок**

4.1.1. В зависимости от оборудования и катета углового шва по табл. 8 выбирают диаметр электродной проволоки.

4.1.2. Из табл. 7 по выбранному диаметру электродной проволоки определяют допускаемую плотность тока или сразу назначают величину сварочного тока.

4.1.3. Площадь наплавленного металла, обеспечивающая при получении шва с плоской поверхностью заданный катет шва, определится по уравнению

$$F_n = k^2/2, \text{ мм}^2. \quad (4.1)$$

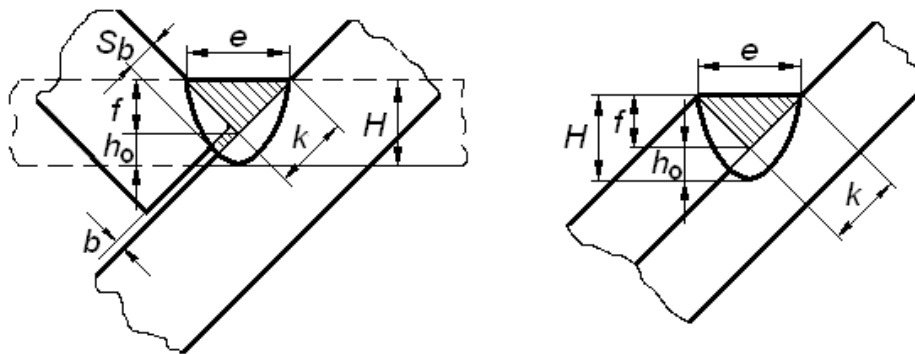


Рис. 9. Геометрические размеры угловых швов

4.1.4. По известным из расчета режима сварки стыковых швов зависимостям рассчитывают:

- напряжение на дуге, В (формула 1.6);
- вылет электрода, мм (формула 1.8);
- коэффициенты расплавления и наплавки, г/А·ч (формулы 2.6).

4.1.5. Скорость сварки рассчитывают по формуле (3.9)

$$V_{св} = \frac{\alpha_n \cdot I_{св}}{\gamma F_n}, \text{ м/ч.}$$

4.1.6. Получение шва с плоской, вогнутой или выпуклой поверхностью зависит от соотношения между величиной сварочного тока и скоростью сварки. При сравнительно невысоких токах и больших скоростях сварки получают вогнутые швы; наоборот, при сварке на больших токах и невысоких скоростях получают выпуклые швы. Значение сварочного тока, которое при данной скорости сварки позволяет получить плоские швы, называют критическим. Критическое значение сварочного тока можно определить по следующему уравнению:

$$I_{кр} = I_0 + mV_{св}, \text{ А,} \quad (4.2)$$

где  $I_0$  – условное значение тока при нулевой скорости, равное примерно 350 А,  $m$  – коэффициент, зависящий от диаметра электродной проволоки (табл. 9).

Таблица 9

Диаметр электродной проволоки, мм	2	4	5
$m$ , А·ч/м	2	7	10

При  $I_{св} > I_{кр}$  получают выпуклые швы.

При  $I_{св} < I_{кр}$  – вогнутые.

При сравнительно невысоких токах и больших скоростях сварки получают вогнутые швы; наоборот, при сварке на больших токах и невысоких скоростях получают выпуклые швы.

4.1.7. Рассчитывают основные размеры шва при сварке стыкового бескосого соединения на принятом режиме для определения общей высоты шва.

Для этого сначала по формуле 2.1 рассчитывают погонную энергию сварки, Дж/см. Затем определяют:

- коэффициент формы проплавления (формула 2.2);
- глубину проплавления, мм (формула 2.3 или 2.4);
- ширину шва, мм (формула 2.5);
- высоту усиления, мм (формула 2.9);
- общую высоту шва,  $H = h'_p + g'$ , мм.

4.1.8. Предполагается, как и в предыдущих случаях, что общая высота шва при наплавке и сварке с разделкой кромок остается при данном режиме неизменной, а полученное значение  $H$  и будет общей высотой углового шва.

Тогда глубина проплавления притупления  $h_0$  может быть определена по формуле

$$h_0 = H - f, \text{ мм}, \quad (4.3)$$

где  $f$  – высота заполнения разделки, т. е. высота наплавленного металла.

Высоту заполнения разделки (угол разделки  $90^\circ$ ) определяют по формуле

$$f = \sqrt{F_n}, \text{ мм}. \quad (4.4)$$

4.1.9. Оценивают глубину проплавления вертикальной стенки  $S_b$  (рис. 9):

$$S_b = (0,8-1,0)h_0, \text{ мм}. \quad (4.5)$$

$S_b = 0,8h_0$  – при плотностях тока, близких к нижнему пределу (табл.7) и  $S_b = h_0$  при плотностях тока, близких к верхнему пределу.

4.1.10. Коэффициент формы углового шва в соответствии с вышесказанным не должен быть более 2.

$$\varphi = \frac{e}{H} \leq 2.$$



В противном случае требуется корректировка режима.

4.1.11. Расчет режима сварки завершают определением скорости подачи проволоки и расхода защитного газа либо толщины слоя флюса и его грануляции.

#### 4.2. Порядок расчета режима сварки угловых швов с разделкой кромок

Если предъявляется требование обеспечить сплошной провар стенки тавра, а при максимально допустимой плотности тока требуемую глубину проплавления обеспечить невозможно, то прибегают к разделке кромок (рис. 10). Определение размеров разделки можно произвести аналогично расчету размеров разделки при сварке стыковых швов.

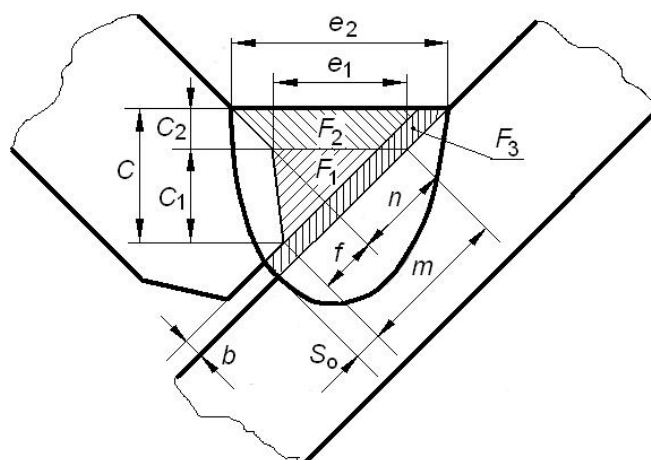


Рис.10. Поперечное сечение наплавленного металла при сварке углового шва с разделкой кромок

4.2.1. В зависимости от оборудования и катета углового шва выбирают диаметр электродной проволоки (табл. 8).

4.2.2. По табл. 7 на основании выбранного диаметра электродной проволоки определяют допускаемую плотность тока или величину сварочного тока.

4.2.3. По известным из расчета режима сварки стыковых швов зависимостям рассчитывают остальные параметры режима:

— напряжение на дуге, В (формула 1.6);

— скорость сварки, м/ч (формула 1.7);

— если  $C_1$  и  $C_2$ , следовательно,  $F_1$  и  $F_2$  заданы, то  $V_{св}$  определяют по формуле 3.9;

— вылет электрода, мм (формула 1.8);

— величину погонной энергии, Дж/см (формула 2.1);

- коэффициент формы проплавления (формула 2.2);
- глубину проплавления, мм (формула 2.3 или 2.4);
- ширину шва, мм (формула 2.5);
- коэффициенты расплавления и наплавки, г/А ч (формула 2.6);
- площадь сечения наплавленного металла, мм<sup>2</sup> (формула 2.8);
- высоту усиления, мм (формула 2.9);
- общую высоту шва, мм.

4.2.4. Рассчитывают площадь разделки

$$F_1 = \frac{f^2 (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg}^2 \alpha)}{2}, \text{ мм}^2. \quad (4.6)$$

4.2.5. Рассчитывают геометрические параметры шва.

Если весь наплавленный металл размещается в разделке ( $F_n \leq F_1$ ), то расчет выполняют в следующем порядке:

- рассчитывают высоту заполнения разделки

$$C = \sqrt{\frac{F_n - Hb}{\operatorname{tg} \alpha/2}}, \text{ мм}; \quad (4.7)$$

- определяют глубину проплавления

$$h_0 = H - C, \text{ мм}, \quad (4.8)$$

$$S_0 \approx h_0, \text{ мм}.$$

Если же наплавленный металл при выполнении сварки одним проходом не размещается в разделке, то общая высота наплавленного металла будет  $C = C_1 + C_2$ . Она определяется по формулам, выведенным на основании известных геометрических зависимостей:

$$m = f(1 + \operatorname{tg} \alpha), \text{ мм}; \quad (4.9)$$

$$C_1 = \frac{f(1 + \operatorname{tg} \alpha)}{\sqrt{2}}, \text{ мм}; \quad (4.10)$$

$$F_2 = F_n - F_1, \text{ мм}^2; \quad (4.11)$$

$$e_1 = \sqrt{2} \cdot f \cdot \operatorname{tg} \alpha, \text{ мм}. \quad (4.12)$$

Высота  $C_2$  определяется из квадратного уравнения

$$AC_2^2 + BC_2 + D = 0 \quad (4.13)$$

где  $A = \operatorname{tg} \alpha/2 + \operatorname{tg}(90 - \alpha/2); \quad (4.14)$

$$B = 2e_1; \quad (4.15)$$

$$D = -2F_2. \quad (4.16)$$

При наличии зазора « $b$ » между вертикальной стенкой и полкой расчет производится по тем же формулам. Но при решении квадратного уравнения член  $D$  определяется как

$$D = \frac{2Hb}{\cos\alpha/2} + m^2 \sin\alpha - 2F_n. \quad (4.17)$$

Тогда общая высота наплавленного металла будет

$$C = C_1 + C_2, \text{ мм}, \quad (4.18)$$

а глубина проплавления

$$h_0 = H - C,$$

$$S_0 \approx h_0.$$

В заключение делается вывод о проплавлении вертикальной стенки двутавра на принятых разделке и режиме сварки.

4.2.6. Расчет режима сварки завершают определением скорости подачи электродной проволоки и расхода защитного газа либо толщины слоя флюса и его грануляции.

## **5. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ СВАРКИ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ**

При сварке низкоуглеродистых сталей тепловое воздействие дуги не вызывает существенных изменений свойств зоны термического влияния, и режимы, выбранные из вышесформулированных условий, обеспечивают необходимые качества сварного соединения. Однако удовлетворительное формирование шва — необходимый, но недостаточный критерий пригодности режима сварки легированных сталей, свойства которых изменяются под воздействием термического цикла сварки. Технологический процесс сварки легированных сталей следует выбирать с учетом ряда свойств стали: склонности к закалке, росту зерна, выпадению карбидов по границам зерен и т. п. Режим сварки должен обеспечивать хорошее формирование шва и не должен вызывать существенного ухудшения свойств околошовной зоны.

### **5.1. Особенности расчета режимов сварки коррозионностойких сталей аустенитного класса**

При нагреве аустенитных хромоникелевых сталей могут протекать процессы, приводящие к потере коррозионной стойкости этих сталей и снижению пластичности. Кроме того, при разработке технологического процесса сварки аустенитных хромоникелевых сталей следует иметь в виду повышенную склонность металла шва к образованию горячих трещин.

Межкристаллитную коррозию вызывают структурные изменения в стали, происходящие вследствие нагрева при сварке. Известно [2, 5], что выдержка, необходимая для приобретения металлом чувствительности к межкристаллитной коррозии, оказывается наименьшей при температуре  $\approx 730-750$  °С. Поэтому следует назначать такой режим сварки, при котором фактическое время пребывания металла шва и околошовной зоны при «опасных» температурах было бы меньше критического ( $t_{кр}$ ).

Для сохранения коррозионной стойкости отношение критического времени к допустимому суммарному времени пребывания в опасной области температур должно составлять

$$\frac{t_{кр}}{(\sum \tau_{оп})_{доп}} \geq 1,45. \quad (5.1)$$

При многократных термических воздействиях, вызываемых многослойной сваркой, условие сохранения стойкости металла против межкристаллитной коррозии можно выразить следующим неравенством:

$$t_{кр} > k\tau_{01} + k_1 \sum_1^n \tau_{оп}, \quad (5.2)$$

где  $t_{кр}$  – критическое время, с; (определяется из графика на рис. 11),

$\tau_{01}$  – время пребывания в области опасных температур 680-780 °С при формировании того слоя шва, стойкость которого определяется, с;

$\sum_1^n \tau_{on}$  – суммарное время пребывания в области опасных температур от

воздействия всех термоциклов сварки (при многослойной сварке) на слой шва, стойкость которого определяется, с;

$k$  и  $k_1$  – поправочные коэффициенты, равные соответственно 2,1 и 1,74.

На рис. 11 приведены зависимости [2], характеризующие влияние различных факторов на критическое время при температуре 730° С. Из них следует, что критическое время  $t_{KP}$  зависит прежде всего от содержания углерода: чем выше содержание углерода в шве, тем меньше критическое время, т. е. тем скорее при данной температуре наступает межкристаллитная коррозия. Критическое время практически не зависит от тепловой мощности дуги при сварке.

Определяя, обеспечивает ли принятый режим сварки швы, стойкие против межкристаллитной коррозии, необходимо сопоставить критическое время в определенных условиях сварки с фактическим временем пребывания металла в опасном интервале температур.

Время пребывания металла в опасном интервале температур можно определить по формуле

$$\tau_{on} = \frac{780 \dots 680}{W_0}, \text{ с}, \quad (5.3)$$

где  $W_0$  – среднее значение скорости охлаждения в интервале температур 780...680 °С:

$$W_0 = \frac{W_{780} + W_{680}}{2}, \text{ град/с}, \quad (5.4)$$

где  $W_{780}$  и  $W_{680}$  – мгновенные скорости охлаждения, определяемые по формулам (5.6, 5.7, 5.8).

При назначении режима сварки из условий формирования шва следует иметь в виду, что аустенитные хромоникелевые стали обладают большим удельным электрическим сопротивлением, чем низкоуглеродистые. Поэтому допускаемая плотность тока при сварке аустенитной электродной проволокой должна быть ниже на 20–25 %.

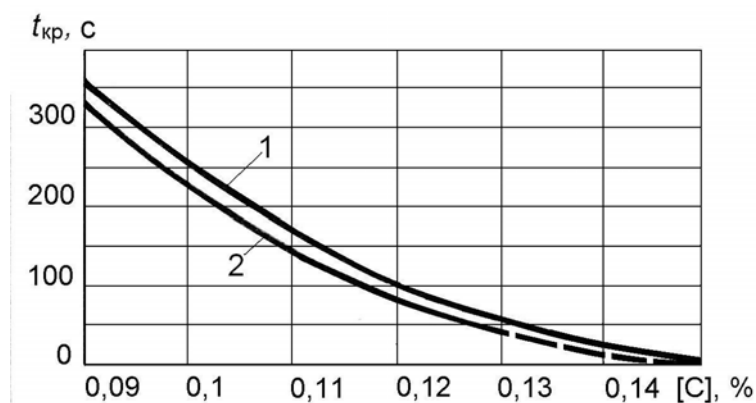


Рис.11. Критическое время при температуре 730 °С во время сварки стали 1Х18Н9Т для швов, выполненных на режимах:

1 — с малой удельной энергией ( $\frac{q}{V_{св} \delta} = 8876 \text{ Дж/см}^2$ );

2 — с большой удельной энергией ( $\frac{q}{V_{св} \delta} = 41032,6 \text{ Дж/см}^2$ )

## 5.2. Особенности расчета режимов сварки закаливаемых сталей

Под воздействием термического цикла сварки в зоне термического влияния закаливаемых сталей может заметно повыситься твердость и снизиться пластичность металла, что резко повышает склонность металла к трещинообразованию. Поэтому, оценив склонность стали к закалке, необходимо рассчитать режим сварки таким образом, чтобы избежать резкой подкалки околошовной зоны.

Чтобы в металле околошовной зоны отсутствовала структура закалки, средняя скорость охлаждения в интервале температур от  $T_1$  до  $(T_{\min} - 55) \text{ }^\circ\text{C}$  не должна превышать предельного значения  $W_{кр}$ , равного

$$W_{кр} = \frac{T_1 - (T_{\min} - 55)}{3 \cdot t_{\min}}, \text{ град/с}, \quad (5.5)$$

где  $T_1$  — температура, соответствующая точке  $A_1$ ;

$T_{\min}$  — температура наименьшей устойчивости аустенита;

$t_{\min}$  — минимальная продолжительность полного распада аустенита.

Значения  $T_1$ ,  $T_{\min}$  и  $t_{\min}$  определяются по термокинетическим или изотермическим диаграммам распада аустенита [4]. В этой же работе величина  $W_{кр}$  приведена для многих марок сталей. Расчет фактической скорости охлаждения производится по формулам (5.6, 5.7, 5.8).

### 5.3. Расчет мгновенной скорости охлаждения металла шва и околошовной зоны

Расчет мгновенной скорости охлаждения металла позволяет оценить пригодность выбранного режима сварки с точки зрения его термического воздействия на свариваемый металл путем ее сравнения с допустимой для данного металла скоростью охлаждения (табл.10).

Теория распространения тепла при сварке позволяет рассчитать мгновенную скорость охлаждения металла при температуре наименьшей устойчивости аустенита ( $T_{\min}$ ) для различных случаев сварки [3].

В случае наплавки валика на массивное тело скорость охлаждения при температуре  $T_{\min}$  может быть рассчитана по следующей формуле:

$$W_{\text{охл}} = 0,02 \cdot \pi \lambda \frac{(T_{\min} - T_o)^2}{q_{\text{п}}}, \text{ град/с}; \quad (5.6)$$

при односторонней сварке листов встык со сквозным проплавлением—

$$W_{\text{охл}} = 2 \cdot 10^{-10} \pi \lambda c \gamma \frac{(T_{\min} - T_o)^3}{(q_{\text{п}} / \delta)^2}, \text{ град/с}; \quad (5.7)$$

при наплавке валика на лист произвольной толщины –

$$W_{\text{охл}} = \omega \cdot 0,02 \cdot \pi \lambda \frac{(T_{\min} - T_o)^2}{q_{\text{п}}}, \text{ град/с}, \quad (5.8)$$

где  $\omega$  — безразмерный критерий процесса, характеризующий влияние режима наплавки, размеров детали и типа соединения,

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/м·град,

$c\gamma$  — объемная теплоемкость, Дж/м<sup>3</sup>·град,

$T_o$  — начальная температура изделия, °С,

$T_{\min}$  — температура наименьшей устойчивости аустенита, °С,

$\delta$  — толщина свариваемого металла, мм,

$q_{\text{п}}$  — погонная энергия сварки, Дж/см.

Для большинства низкоуглеродистых и низколегированных сталей можно принять  $\lambda = 37,8$  Вт/м·град,  $c\gamma = 5,22 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>·град,  $T_{\min} = 550-600$  °С.

Безразмерный критерий  $\omega$  зависит от другого безразмерного критерия  $1/\Theta$ :

$$1/\Theta = \frac{2 \cdot 10^8 \cdot q_n}{\pi \cdot \delta^2 \cdot c \gamma (T_{\min} - T_0)} \quad (5.9)$$

Н.Н. Рыкалиным построена расчетная зависимость  $\omega = f(1/\Theta)$  (рис. 12) для определения мгновенной скорости охлаждения при наплавке валика на лист. Сначала по формуле (5.9) определяется  $1/\Theta$ . Затем по номограмме (рис. 12) находится значение  $\omega$ , после чего по формуле (5.8) определяется скорость охлаждения.

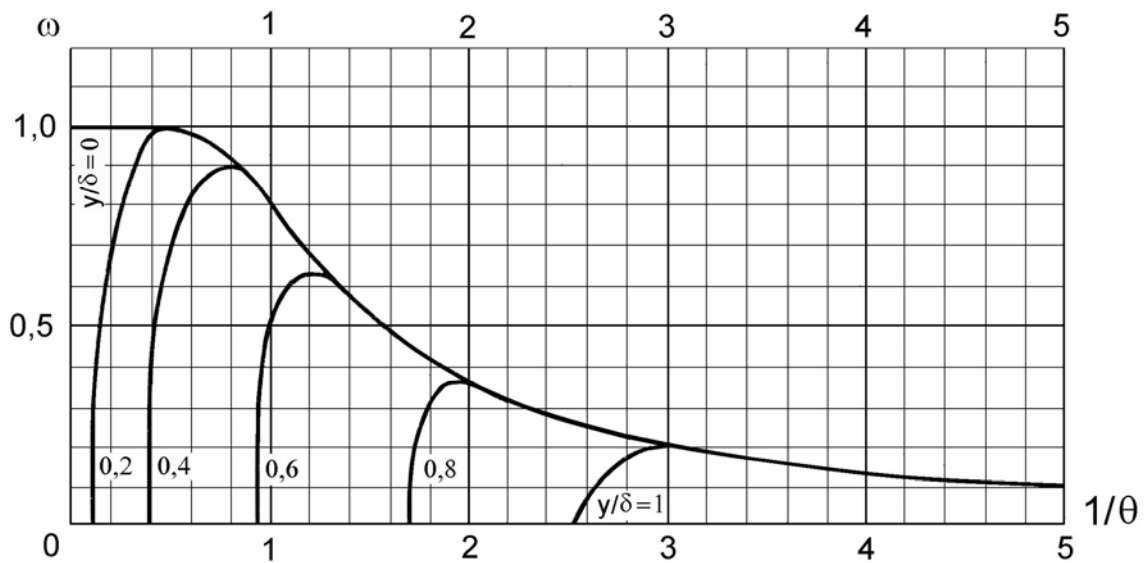


Рис.12. Номограмма для определения безразмерного критерия  $\omega$  при расчете мгновенной скорости охлаждения при наплавке валика на лист [2]:  
 $y$  – расстояние от оси шва,  $\delta$  – толщина листа

Чтобы приблизить расчетную схему к действительным условиям ввода тепла в изделие при наплавке валика на лист, необходимо ввести поправочный коэффициент  $k_1$  погонной энергии, позволяющий учитывать разделку шва, и коэффициент приведения толщины  $k_2$ . Значения коэффициентов приведения  $k_1$  и  $k_2$  для некоторых случаев сварки приведены в табл. 11 по данным Н.Н. Рыкалина. При расчете скорости охлаждения при сварке первого слоя в формулы (5.8 и 5.9) следует подставлять не истинные значения погонной энергии  $q_n$  и толщины металла  $\delta$ , а приведенные:  $(q_n)_{\text{привед.}} = k_1 \cdot q_n$ ;  $(\delta)_{\text{привед.}} = k_2 \cdot \delta$ .

При многопроходной сварке длинными участками расчетным является первый слой. При весьма длинных участках (1,5 м) иногда проверяют и скорость охлаждения последнего слоя.



Если значение рассчитанной скорости охлаждения не выходит за пределы оптимального интервала (табл. 10), то выбранный режим сварки обеспечит получение заданных свойств металла в околошовной зоне. В противном случае следует изменить режим или технологию сварки. Например, вместо однопроходной применить многопроходную сварку или же для снижения скорости охлаждения околошовной зоны с целью получения в ней структур, обладающих запасом пластичности, достаточным для предотвращения образования трещин под действием термомодеформационного цикла, ввести предварительный подогрев, рассчитав его величину ( $T$ ) из уравнений 5.6, 5.7, 5.8 в зависимости от типа сварного соединения из условия получения заданной скорости охлаждения металла околошовной зоны.

Таблица 10

Оптимальный интервал скоростей охлаждения металла в околошовной зоне (по Шоршорову М.Х.)

Тип стали	Оптимальный интервал, град/с	По каким свойствам выбран*
1	2	3
Ст3 кп	1,2...12,0	$\alpha_n \geq 0,20$ при $-50$ °С
Б Ст3	1,4...15,0	$\alpha_n \geq 0,50$ при $-50$ °С
35	0,12...7,0	$\alpha_n \geq 0,20$ при $+20$ °С
40	2,4...5,0	$\alpha_n \geq 0,60$ при $+20$ °С
45	2,0...4,0	$\alpha_n \geq 0,35$ при $+20$ °С
09Г2	1,0...15,0	$\alpha_n > 0,30$ при $-60$ °С
16ГС	1,0...12,0	$\alpha_n > 0,20$ при $-60$ °С
17ГС	10,0...30,0	$\alpha_n \geq 0,4$ при $-60$ °С
10Г2СД	1,0...15,0	$\alpha_n \geq 0,2$ при $-60$ °С
14ХГС	0,8...2,6	$\alpha_n \geq 0,5$ при $-60$ °С
14ХГ2	1,2...5,5	$\alpha_n \geq 0,2$ при $-50$ °С
10ХСНД	0,8...15,0	$\alpha_n \geq 1,2$ при $+20$ °С
15ХСНД	1,8...9,0	$\alpha_n > 0,7$ ; $\phi > 100\%$ при $+20$ °С
40Х**	4,0...14,0	$\alpha_n \geq 0,5$ при $+20$ °С
23Г	2,5...70,0	$\alpha_n \geq 0,5$ при $+20$ °С
25Г2Л	не более 8,0	$\psi > 20\%$ при $+20$ °С
30Г2Л	не более 6,0	$\psi > 20\%$ при $+20$ °С
12МХ	2...100	$\psi > 10\%$ при $+20$ °С
30ХМА	0,1...10	$\psi \geq 30\%$ ; $\delta \geq 12\%$ при $+20$ °С
35ХМ	1,0...5,0	$\psi \geq 25\%$ при $+20$ °С
20ХГС	1,9...12,0	$\alpha_n \geq 0,5$ ; $\phi \geq 75\%$ при $+20$ °С
25ХГСА	0,07...1,3	$\psi > 20\%$ при $+20$ °С
30ХГСА**	1,6...6,0	$\psi \geq 22\%$ при $+20$ °С
35ХГСА**	1,5...7,0	$\alpha_n \geq 0,5$ при $+20$ °С
40ХГСА**	не более 0,5	$\psi \geq 20\%$ при $+20$ °С
45ХНМТА**	не более 0,5	$\psi \geq 20\%$ при $+20$ °С
12Х2Н4МД	не ограничена	$\psi \geq 35\%$ при $+20$ °С
Х5М	0,8...8,0	$\psi > 25\%$ при $+20$ °С
Х5ВА	0,8...15,0	$\psi \geq 25\%$ при $+20$ °С

\* $\alpha_n$  - ударная вязкость, МДж/м<sup>2</sup>;  $\psi$ - относительное сужение;  $\delta$  – относительное удлинение;  $\varphi$  - угол загиба.

\*\* При предварительном подогреве 100...200 °С.

Прочность и работоспособность сварного соединения зависит не только от формы шва и термического цикла сварки, но и от соотношения механических свойств металла шва, околошовной зоны и основного металла. При оценке ожидаемых механических свойств металла шва необходимо учитывать действие следующих технологических факторов:







- долю участия основного металла в формировании шва и его химический состав;
- тип и химический состав сварочных материалов;
- способ и режимы сварки;
- тип соединения и число проходов;
- размеры сварного соединения;
- величину пластических деформаций растяжения в металле при его охлаждении.

В связи с этим недостаточно выбрать режимы сварки или наплавки только по показателям сплошности, правильного формирования, отсутствия дефектов, устойчивости и производительности процесса. Необходимо выбирать такие режимы, которые, обеспечивая указанные выше требования, способствовали бы также получению благоприятных структур и механических свойств металла шва и зоны термического влияния.

На основании изучения всех факторов, влияющих на механические свойства металла, разработаны расчетные способы определения химического состава, оценки ожидаемых механических свойств и сварочных деформаций, описание которых не вошло в содержание методических указаний.

Таблица 11

Коэффициенты приведения для расчета скорости охлаждения при сварке

Тип соединения	Схема соединения	Значения коэффициентов приведения	
		$k_1 \cdot q_n$	$k_2 \cdot \delta$
Наплавка на лист		$1 \cdot q_n$	$1 \cdot \delta$
Сварка двустороннего стыкового шва		$1 \cdot q_n$	$1 \cdot \delta$
Сварка первого слоя шва стыкового соединения		$\frac{3}{2} \cdot q_n$	$\frac{3}{2} \cdot \delta$
Сварка внахлестку		$\frac{2}{3} \cdot q_n$	$1 \cdot \delta$
Сварка таврового соединения		$\frac{2}{3} \cdot q_n$	$1 \cdot \delta$
Сварка крестового соединения		$\frac{1}{2} \cdot q_n$	$1 \cdot \delta$

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акулов А.И. Технология и оборудование сварки плавлением / А.И. Акулов, Г.А. Бельчук, В.П. Демянцевич. М.: Машиностроение, 1977. 432 с.
2. Окерблом Н.О. Проектирование технологии изготовления сварных конструкций / Н.О. Окерблом, В.П. Демянцевич, И.Л. Байкова Л.: Судпромгиз, 1963. 600 с.
3. Рыкалин Н.Н. Тепловые процессы при сварке плавлением / Н.Н. Рыкалин, П.И. Пугин. М.: Профиздат, 1959.
4. Шоршоров М.Х. Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке: Атлас / М.Х. Шоршоров, В.В. Белов. М.: Наука, 1972. 219 с.
5. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением; под ред. Б.Е. Патона. М.: Машиностроение, 1974. 767 с.
6. Шоршоров М.Х. Металловедение сварки стали и сплавов титана / М.Х. Шоршоров / М.: Наука, 1965. 336 с.

*Учебное издание*

Составитель: **Катаев** Рудольф Федорович

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА  
МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ  
ЭЛЕКТРОДОМ

Редактор *Н.В. Рощина*

Компьютерная верстка *авторская*

---

Подписано в печать		Формат 60x84 1/16
Бумага писчая	Плоская печать	Усл. печ. л. 2,09
Уч.-изд. л. 2,0	Тираж	Заказ

---

Редакционно-издательский отдел УГТУ-УПИ  
620002, Екатеринбург, Мира 19  
[rio@mail.ustu.ru](mailto:rio@mail.ustu.ru)