

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р

Волгоградский ордена Трудового Красного Знамени политехнический
институт

Кафедра оборудования и технологии сварочного
производства

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Методические указания к курсовому и дипломному проектированию
для студентов специальности 0504 - Оборудование и технология
сварочного производства

План уч.-метод. документ. 1987 г., поз. 106.

Составитель Е.П.Полятаев

Расчет режимов дуговой сварки

Методические указания к курсовому и дипломному
проектированию

Редактор Л.Н.Голованова

Подписано в печать 7.4.87 Формат 60x84/16.
Бумага газетная. Печать плоская. Усл.-печ.л. 2,0.
Усл.-изд.л. 1,9. т. 500 экз. Заказ 181 Бесплатно.
Межвузовский ротационный участок ВолгПИ.
Волгоград, ул.Советская, 35.

Волгоград 1987

Расчет режимов дуговой сварки: Метод. указания к курсовому и дипломному проектированию / Сост. Е.П.Покайтзеv.- Волгоград: ВолгПИ, 1987. - 47 с.

В работе приведены методы расчета режимов ручной дуговой и механизированной сварки стыковых и угловых соединений из низкоуглеродистых, низколегированных, закалившихся и высоколегированных сталей, а также механических свойств металла шва.

Для студентов специальности 0504 "Оборудование и технология сварочного производства" (дневной и вечерней форм обучения), выполняющих курсовой проект по "Технологии, механизации и автоматизации сварочного производства" и дипломный проект.

Ил. 10. Табл. 15.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
В в е д е н и е	4
1. Расчет режимов и размеров шва при ручной дуговой сварке покрытыми электродами	6
2. Расчет режимов и размеров шва при механизированной дуговой сварке	13
2.1. Расчет режимов сварки и размеров односторонних и двусторонних стыковых швов без разделки кромок и без зазора в стыке	13
2.2. Расчет режимов сварки и размеров швов стыковых соединений с зазором и разделкой кромок	21
2.3. Расчет режимов сварки и размеров многопроходных швов стыковых соединений с разделкой кромок	22
2.4. Расчет режима сварки и размеров швов тавровых и угловых соединений	25
3. Расчет режимов дуговой сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей	29
3.1. Выбор критериев для расчетного определения режимов сварки	29
3.2. Последовательность расчета режима сварки	31
4. Расчет режимов дуговой сварки закалившихся сталей	34
4.1. Критерии расчетного определения режимов сварки	34
4.2. Последовательность расчета режима сварки	35
5. Расчет режимов дуговой сварки высоколегированных аустенитных сталей	38
6. Расчетная оценка ожидаемых механических свойств металла шва	40
6.1. Расчет механических свойств металла шва при сварке низкоуглеродистых сталей	40
6.2. Расчет механических свойств металла шва при сварке легированных сталей	41

ВВЕДЕНИЕ

Режим сварки является основным элементом технологического процесса сварки той или иной конструкции либо изделия. От правильного выбора его в значительной мере зависит качество сварного соединения, производительность и экономическая эффективность технологического процесса сварки в целом.

В практике наиболее широко выбор параметров режима сварки производят по различным таблицам и номограммам, построенным на основании большого числа экспериментов. Однако номограммы и таблицы не содержат информации о таких важных и необходимых для технолога сведениях, как: размеры и формы шва, доля участия основного металла в формировании шва, температура и скорость охлаждения металла шва и ОШЗ, длительность его выдержки в опасном интервале температур химический состав металла шва, механические свойства металла шва и т.д. Только наличие указанных сведений позволяет из нескольких вариантов выбрать оптимальный, обеспечивающий не только отсутствие дефектов, но и наиболее благоприятные прочностные и эксплуатационные свойства при наибольшей производительности и экономичности. Выбор оптимальных режимов сварки должен базироваться на сравнении указанных количественных показателей нескольких вариантов, а это наиболее просто и объективно можно сделать расчетным путем. Поэтому овладение расчетными методами определения режима сварки, размеров и формы шва, скорости охлаждения металла шва и ОШЗ, длительности выдержки металла шва в опасном интервале температур и т.д. является важной задачей для инженера-сварщика.

Расчет режима сварки производят в два этапа. На первом рассчитывают параметры режима сварки, исходя из условий получения швов с оптимальными размерами и формой, обеспечивающими как высокую технологическую прочность, так и высокие эксплуатационные характеристики, т.е. хорошее формирование шва (разделы 1 и 2 настоящих методических указаний). На втором этапе расчета уточняют полученные на первом этапе параметры режима сварки, исходя из получения такого термического цикла, который обеспечит оптимальные свойства ШВ и металла шва (разделы 3, 4, 5 настоящих методических указаний). При этом необходимо, чтобы новый режим сварки обеспечивал и нормальное формирование шва.

Расчет механических свойств металла шва приведен для низкоуглеродистых и легированных сталей.

Методика расчета, изложенная в методических указаниях, применима для расчета режимов дуговой сварки покрытыми электродами, под флюсом и в защитных газах.

Методические указания составлены в основном по результатам работ академика Н.Н.Рыкалина, профессоров А.И.Акулова, Г.А.Бельчука, В.Л.Демянцева, М.Х.Шоршорова и предназначены для разработки технологического процесса сварки в курсе "Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки" и для выполнения расчетной части курсового и дипломного проектов.

1. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ И РАЗМЕРОВ ШВА ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

При ручной дуговой сварке покрытыми электродами основными параметрами режима сварки являются диаметр электрода, сила сварочного тока, напряжение дуги, род тока, полярность, скорость сварки, площадь поперечного сечения шва, выполняемого за один проход, числа проходов и др.

Поскольку марку электрода выбирают, исходя из свойств основного металла, то такие параметры режима сварки, как род тока, полярность, коэффициент наплавки устанавливают по паспортным данным электрода.

1.1. Выбор диаметра электрода

Диаметр электрода d_3 назначают в зависимости от толщины листов при сварке швов стыковых соединений и от катета шва при сварке швов угловых и тавровых соединений (табл. 1.1.)

Таблица 1.1.

Диаметр электрода в зависимости от толщины листов и катета шва

Вид шва	Толщина листов или катет шва, мм	Диаметр электрода, мм
1. Стыковой	1,5 - 2,0	1,6 - 2,0
	3,0	3,0
	4,0 - 8,0	4,0
	9,0 - 12,0	4,0 - 5,0
	13,0 - 15,0	5,0
2. Угловой	15 и более	5,0 - 10,0
	3,0	3,0
	4,0 - 5,0	4,0
	6,0 - 9,0	5,0

При сварке многопроходных швов стремятся все проходы выполнять на одних и тех же режимах. Исключением является первый проход,

который обычно выполняется электродами диаметром 3-4 мм, так как применение электродов большего диаметра затрудняет провар корня шва.

В табл. 1.1 диаметры электрода приведены для сварки в нижнем положении. В потолочном и горизонтальном положениях пользуются электродами диаметром не более 4 мм, а в вертикальном - не более 5 мм.

1.2. Определение сварочного тока

Расчет силы сварочного тока при сварке покрытыми электродами производится в зависимости от диаметра электрода и допустимой плотности тока

$$I_{св} = \frac{\pi d_3^2}{4} j, \quad (1.1)$$

где d_3 - диаметр электрода (стержня) мм;
 j - допустимая плотность тока, А/мм² (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Допустимая плотность тока j в электроде при ручной дуговой сварке покрытыми электродами

Вид покрытия	j , А/мм ² в электроде при d_3 , мм			
	3	4	5	6
1. Кислое (А) и рутиловое (Р)	14-20	11,5-16	10 - 13,5	9,5-12,5
2. Основное (Б)	13 - 18,5	10 - 14,5	9 - 12,5	8,5-12,0
3. Целлюлозное (Ц)	12,7-16,9	9,6-13,6	8,2-9,7	-

Чем больше диаметр электрода, тем меньше допустимая плотность тока, так как ухудшаются условия охлаждения.

При приближенных расчетах сварочный ток определяют по эмпирической формуле

$$I_{св} = kd_3, \quad (1.2)$$

где K - коэффициент, принимаемый в зависимости от диаметра стержня электрода (табл. I.3).

Таблица I.3

Значения коэффициента "K" в зависимости от диаметра стержня электрода

Диаметр стержня электрода d_s , мм	2	3	4	5	6
Коэффициент K , А/мм	25-30	30-45	35/50	40-55	45-60

При сварке в положениях, отличных от нижнего, с целью улучшения формирования шва сварочный ток уменьшается по сравнению с расчетными по формулам (I.1 и I.2) на 10-20 %.

1.3. Напряжение на дуге (U_d)

Напряжение на дуге при ручной дуговой сварке, покрытыми электродами составляет как правило 20 - 36 В и при проектировании технологических процессов сварки выбирается на основании рекомендаций паспорта на данную марку электрода.

1.4. Площадь поперечного сечения шва, наплавляемая за один проход

Следует иметь в виду, что:

1) максимальное поперечное сечение первого прохода в многослойных швах не должно превышать 30 - 35 мм², а последующих проходов - 30 - 40 мм²;

2) при сварке угловых и тавровых соединений за один проход выполняются швы катетом не более 8 - 9 мм. При необходимости выполнения шва с большим катетом применяется сварка за два прохода и более.

При сварке швов стыковых соединений площадь поперечного сечения металла, наплавленного за один проход, при которой обеспечиваются оптимальные условия формирования, составляет (мм²): для первого прохода (при подварке корня шва)

$$F_1 = (6 + 8) d_s ; \quad (I.3)$$

для последующих проходов

$$F_n = F_n = (8 + 12) d_s . \quad (I.4)$$

1.5. Определение числа проходов

Общая площадь наплавленного металла F_n при сварке угловых и тавровых соединений вычисляется по формуле:

$$F_n = \frac{K_y \cdot K^2}{2} , \quad (I.5)$$

где K - катет шва, мм;

K_y - коэффициент увеличения, учитывающий наличие взвоза и выпуклость (усиление) шва (табл. I.4).

Таблица I.4

Зависимость коэффициента увеличения K_y от катета шва

Катет мм, K	3-4	5-6	7-10	12-20	20-30	30
Коэффициент K_y	1,5	1,35	1,25	1,15	1,10	1,05

При сварке стыковых соединений с разделкой кромок общая площадь поперечного сечения наплавленного металла равна (рис. I.1):

$$F_n = 2F' + F'' + F''' ,$$

или

$$F_n = h^2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + bS + \frac{2}{3} ge . \quad (I.6)$$

Число проходов равно: при сварке угловых и тавровых соединений

$$n = F_n / F_1 , \quad (I.7)$$

где F_n и F_n - определяются соответственно по формулам (1.5) и (1.4),

при сварке стыковых соединений

$$n = \frac{F_n - F_1}{F_n} + 1, \quad (1.8)$$

где F_n , F_1 , F_n - определяются соответственно по формулам (1.6, 1.3, 1.4).

1.6. Скорость сварки

Скорость ручной дуговой сварки обычно задается и контролируется косвенно по необходимым размерам получаемого шва и может быть определена по формуле (см/с):

$$V_{св} = \frac{\alpha_n \cdot I_{св}}{3600 \cdot \gamma \cdot F_n'}, \quad (1.9)$$

где α_n - коэффициент наплавки, г/А.ч.;

F_n' - площадь поперечного сечения наплавленного металла за данный проход, см²;

γ - плотность наплавленного металла, г/см³.

1.7. Погонная энергия q_n (ккал/см.)

$$q_n = \frac{0,24 I_{св} \cdot U_g \cdot \eta_u}{V_{св}}, \quad (1.10)$$

где η_u - 0,70 - 0,85 - эффективный к.п.д. дуги.

При приближенных расчетах величины погонной энергии можно пользоваться формулой (ккал/см.):

$$q_n = 14500 F_n, \quad (1.11)$$

где F_n - площадь поперечного сечения металла, наплавленного за данный проход, см².

1.8. Глубина провара

Необходимость определения глубины провара H при ручной дуговой сварке может возникнуть только для стыковых соединений без разделки кромок, диапазон толщин которых согласно ГОСТ 5264-80 ограничен, либо при ручной предварительной подварке корня шва. При необходимости глубина провара H при наплавке валика на лист из низкоуглеродистых или низкоуглеродистых низколегированных конструкционных сталей с достаточной для практических целей степенью точности может быть определена по формуле (см):

$$H = (0,0056 \div 0,0078) \sqrt{q_n}. \quad (1.12)$$

1.9. Высота заполнения разделки

При технологических расчетах иногда возникает необходимость определения высоты заполнения разделки Z одним или несколькими проходами (рис. 1.2). Это может быть достигнуто решением квадратного уравнения

$$z^2 + nz + m = 0, \quad (1.13)$$

где $n = -(-2c - \frac{b}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}})$,

$$m = -(\frac{F_n}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} - c^2).$$

К определению F_n

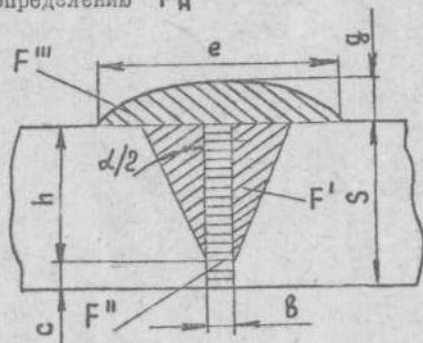


Рис. 1.1.

К определению высоты заполнения разделки Z

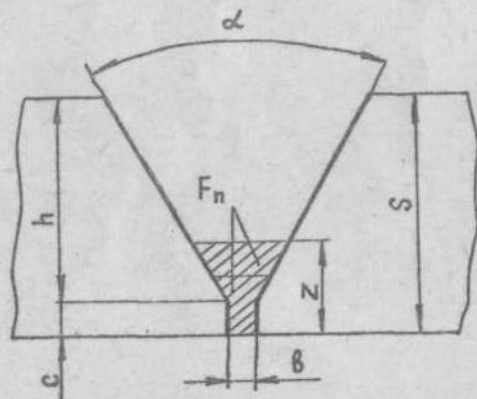


Рис. 1.2

2. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ И РАЗМЕРОВ ШВА ПРИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

К параметрам режима механизированной дуговой сварки под флюсом и в защитных газах, определяемых расчетом, относятся: сварочный ток ($I_{св}$), напряжение на дуге (U_d), скорость сварки ($U_{св}$), диаметр ($d_э$) и скорость подачи электродной проволоки ($U_{п.э}$). Остальные параметры: защитная среда (газовая, шлаковая, газослаковая), род и полярность тока, вылет электрода (l), угол наклона электрода и изделия, начальная температура изделия, расход флюса или защитного газа и т.д. устанавливаются, исходя из условий сварки конкретных изделий либо марки стали.

Шов характеризуется (рис. 2.1, а) глубиной проплавления (H), шириной шва (e), высотой усиления (g), коэффициентом формы провара ($\psi_{пр} = e/H$) и коэффициентом формы валика ($\psi_в = e/g$).

Расчет режима сварки производится всегда для конкретных случаев, когда известны марка свариваемой стали, способ сварки, выбраны сварочные материалы: марка флюса или защитного газа, марка сварочной проволоки и другие данные по шву и технологическому процессу. До начала расчетов по чертежу, рекомендациям соответствующих ГОСТов или ТУ устанавливаются вид соединения, форму подготовки кромок и размеры конструктивных элементов подготовки кромок, а также шва сварного соединения. Выбранные форма, размеры подготовки кромок и шва изображают на бумаге в натуральную величину или в масштабе с сохранением оптимальных размеров по глубине провара, ширине шва, высоте усиления, площади сечения наплавленного металла. Затем производят расчет режимов сварки из условия обеспечения выбранных по соответствующему ГОСТу или ТУ размеров шва в последовательности, определяемой типом соединения.

2.1. Расчет режимов сварки и размеров односторонних и двусторонних стыковых швов без разделки кромок и без зазора в стыке

1) Устанавливают требуемую глубину провара (H), мм. При односторонней односторонней сварке на весу (рис. 2.1, а):

$$H = (0,7 - 0,8) S \quad (2.1)$$

Если $H > (0,7 \div 0,8) S$, то проплавление скачкообразно увеличивается и возможен прожог металла, однако при сварке на флюсовой, флюсомедной подушках и медном ползуне (соединения типа С4, ГОСТ 8713-79)

$$H = S \quad (2.2)$$

на остающейся подкладке и в замковом соединениях

$$H \text{ не менее } S. \quad (2.3)$$

При двухсторонней сварке необходимо обеспечить сплошность провара сечения, поэтому (рис. 2.1, б, в)

$$H_1 + H_2 = S + K, \quad (2.4)$$

где K - перекрытие, оно обычно равно 2 - 5 мм.

Когда по условиям работы не требуется сквозной провар, глубину провара задект на 2 - 3 мм меньше половины толщины металла.

Если шов симметричный, то (рис. 2.1, б)

$$H_1 = H_2 = \frac{S + K}{2}, \quad (2.5)$$

а если несимметричный, то глубина проплавления шва меньшего сечения равна (рис. 2.1, в)

$$H_1 = (0,3 - 0,35) S, \quad (2.6)$$

если $H_1 < (0,3 - 0,35) S$, то при выполнении шва большего сечения с другой стороны возможен прожог, так как $H_2 > (0,7 - 0,8) S$.

2. Определяют величину сварочного тока ($I_{св}$), обеспечивающего заданную глубину провара (H_1), по формуле (А):

$$I_{св} = \frac{H_1}{K_n} \cdot 100, \quad (2.7)$$

где K_n - коэффициент пропорциональности, величина которого зависит от условий проведения сварки (табл. 2.1).

3. Выбирают диаметр электродной проволоки по формуле (мм):

$$d_3 = 1,13 \sqrt{\frac{I_{св}}{j}}, \quad (2.8)$$

где j - допустимая плотность тока, A/mm^2 , которая при механизированной сварке стыковых швов без сноса кромок зависит от диаметра электрода (табл. 2.2).

Таблица 2.1

Значения K_n в зависимости от условий сварки

Марка флюса или защитного газа	Диаметр электродной проволоки, мм	K_n , мм/100 А при сварке на		
		Переменном токе	Постоянном токе прямой полярности	Постоянном токе обратной полярности
ОСЦ-45	2	1,30	1,15	1,45
	3	1,15	0,95	1,30
	4	1,05	0,85	1,15
	5	0,95	0,75	1,10
	6	0,90	-	-
АН-348 А	2	1,25	1,15	1,40
	3	1,10	0,95	1,25
	4	1,00	0,90	1,10
	5	0,95	0,85	1,05
	6	0,90	-	-
Углекислый газ	1,2	-	-	2,10
	1,6	-	-	1,75
	2,0	-	-	1,55
	3,0	-	-	1,45
	4,0	-	-	1,35
5,0	-	-	1,20	

Таблица 2.2

Значения j в зависимости от d_3

d_3 , мм	1	2	3	4	5	6
j , A/mm^2	90-400	65-200	45-90	35-60	30-50	25-45

Полученное расчетное значение d_3 округляется до ближайшего целого.

4) Определяют напряжение на дуге

$$U_d = 20 + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{d_3^{0,5}} \cdot I_{св} \pm 1. \quad (2.9)$$

5) Определяют скорость сварки $U_{св}$, из условия обеспечения такой формы шва, при которой последний будет иметь высокую работоспособность и стойкость к кристаллизационным трещинам. Это возможно, когда коэффициент формы ванны $\psi = L/e$ (L - длина ванны, e - ширина ванны) на различных режимах сварки остается неизменным. Согласно теории распространения тепла при сварке для сохранения геометрического подобия ванны необходимо обеспечить

$$I_{св} \cdot U_{св} = A = \text{const}. \quad (2.10)$$

Для получения швов требуемой формы, обладающих высокой технологической прочностью, значения A принимают в пределах, приведенных в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Значения A в зависимости от d_3

d_3 , мм	1,2	1,6	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
A , А·м/ч	2000-5000	5000-8000	8000-12000	12000-16000	16000-20000	20000-25000	25000-30000

Тогда скорость сварки определяется как (м/ч)

$$U_{св} = \frac{A}{I_{св}}. \quad (2.11)$$

При этом необходимо иметь в виду, что при механизированной сварке без применения особых технологических приемов скорость сварки должна находиться в пределах 15 - 60 м/ч, а расчетные значения скорости сварки должны округляться до ближайших, которые можно установить на выбранном для сварки автомате.

6) Рассчитывают погонную энергию q_n по формуле (1.10), принимая значения эффективного к.п.д. нагрева изделия дугой при сварке под флюсом $\eta_u = 0,85 - 0,95$, при сварке в углекислом газе $\eta_u = 0,80 - 0,84$; $U_{св}$ - скорость сварки, м/с.

7) Определяют коэффициент формы провара

$$\psi_{пр} = k' (19 - 0,01 I_{св}) \frac{d_3 \cdot U_d}{I_{св}}, \quad (2.12)$$

где d_3 - диаметр электродной проволоки, мм, а значения k' находятся из табл. 2.4.

Таблица 2.4

Значения k' в зависимости от рода и полярности тока

Род и полярность тока		Значение k'	
		При $j < 120 \text{ А/мм}^2$	При $j \geq 120 \text{ А/мм}^2$
Постоянный ток	Прямая полярность	$\frac{2,82}{j \cdot 0,1925}$	1,12
	Обратная полярность	$0,367 \cdot j \cdot 0,1925$	0,92
Переменный ток		1,00	1,00

Для механизированной сварки $\psi_{пр}$ должен находиться в пределах 0,8 - 4. При меньшем значении будут получаться швы, склонные к образованию горячих трещин, при больших - слишком широкие швы с малой глубиной провара, что нерационально с точки зрения использования теплоты дуги и приводит к увеличенным деформациям.

8) Определяют глубину провара H (см): при сварке под флюсом низкоуглеродистых и низколегированных сталей

$$H = 0,0156 \sqrt{\frac{q_n}{\psi_{пр}}}, \quad (2.13)$$

при сварке тех же сталей в углекислом газе

$$H = 0,0165 \sqrt{\frac{q_n}{\psi_{пр}}}, \quad (2.14)$$

в общем случае при сварке других материалов

$$H = 2\sqrt{\frac{q_n}{\pi e \sigma \gamma \cdot T_{пл} \cdot \psi_{пр}}}, \quad (2.15)$$

где $e = 2,718$ - основание натуральных логарифмов,
 $\sigma \gamma$ - объемная теплоемкость свариваемого металла, кал/см³.
^{°C};

$T_{пл}$ - температура плавления свариваемого металла, ^{°C};

q_n - кал/см.

9) Определяют ширину шва e (мм)

$$e = \psi_{пр} \cdot H. \quad (2.16)$$

10) Устанавливают вылет электрода l .

При сварке под флюсом вылет электрода выбирают в пределах 20 - 80 мм, при этом меньшим диаметром электрода соответствуют меньшие значения вылета и наоборот. При сварке в углекислом газе вылет электрода l выбирают в пределах 10 - 20 мм.

11) Определяют коэффициент наплавки α_n .

При сварке под флюсом ввиду незначительных потерь электродного металла с достаточной для практических расчетов степенью точности можно принять, что коэффициент наплавки α_n равен коэффициенту расплавления α_p .

Значение α_p состоит из двух слагаемых

$$\alpha_p = \alpha_p^B + \alpha_p^T, \quad (2.17)$$

где α_p^B - составляющая коэффициента расплавления, обусловленная тепловложением дуги, г/А·ч;

α_p^T - составляющая коэффициента расплавления, зависящая от тепловложения вследствие предварительного нагрева вылета электрода притекающим током, г/А·ч.

При сварке постоянным током обратной полярности

$$\alpha_p^B = 11,6 \pm 0,4. \quad (2.18)$$

При сварке переменным и постоянным током прямой полярности

$$\alpha_p^B = A + B \frac{I_{св}}{d_3}, \quad (2.19)$$

где d_3 - диаметр электродной проволоки, мм;
 A и B - коэффициенты, значения которых приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Значение коэффициентов A и B в зависимости от рода тока

Род тока	Коэффициент	
	A	B
1. Постоянный прямой полярности	6,3	0,065
2. Переменный	7,0	0,04

Величина составляющей α_p^T может быть рассчитана по уравнению

$$\alpha_p^T = 3,1 \cdot 10^{-4} \sqrt{I_{св}} \frac{l}{d_3^2}, \quad (2.20)$$

где l и d_3 - вылет и диаметр электрода в мм.

При сварке в углекислом газе

$$\alpha_n = \alpha_p (1 - \psi), \quad (2.21)$$

где ψ - коэффициент потерь.

Коэффициент расплавления α_p рассчитывают по формуле (г/А·ч)

$$\alpha_p = 9,05 + 3,1 \cdot 10^{-4} \sqrt{I_{св}} \frac{l}{d_3^2}, \quad (2.22)$$

где l и d_3 - в мм.

Коэффициент потерь в диапазоне плотностей тока 60-320 А/мм² равен:

$$\psi = 4,72 + 17,6 \cdot 10^{-2} j - 4,48 \cdot 10^{-4} j^2. \quad (2.23)$$

12) Определяют скорость подачи электродной проволоки (г/ч)

$$V_{н.а.} = \frac{4 \alpha_n \cdot I_{св}}{\pi d_3^2 \cdot \gamma}, \quad 391,37 \quad (2.24)$$

где d_3 - диаметр электродной проволоки, мм,
 γ - удельный вес металла, г/см³.

Скорость подачи электродной проволоки $U_{п.з.}$ окончательно принимает с учетом технической характеристики автомата, на котором будет производиться сварка.

13) Определяют площадь наплавленного металла (см^2)

$$F_{н} = \frac{\alpha_{н} \cdot I_{св}}{3600 \cdot \gamma \cdot U_{св}}, \quad (2.25)$$

где $U_{св}$ - скорость сварки, см/с;
 γ - удельный вес металла, г/см³.

14) Определяют высоту валика. При сварке под флюсом и в углекислом газе в диапазоне режимов, обеспечивающих удовлетворительное формирование шва, коэффициент полноты валика изменяется в узких пределах и практически равен $M_{в} = 0,73$. Тогда высота валика равна (мм)

$$g = \frac{F_{н}}{0,73 \cdot e}, \quad (2.26)$$

где e - ширина шва, мм;
 $F_{н}$ - площадь наплавленного металла, мм².

15) Определяют общую высоту шва C (мм)

$$C = H + g. \quad (2.27)$$

16) Определяют коэффициент формы усиления

$$\Psi_{в} = \frac{e}{g}. \quad (2.28)$$

Для хорошо сформированных швов $\Psi_{в}$ должен находиться в пределах $7 + 10$. Малые значения $\Psi_{в}$ имеют место при узких и высоких швах, такие швы не имеют плавного сопряжения с основным металлом и обладают неудовлетворительной работоспособностью при переменных нагрузках. Большие значения $\Psi_{в}$ соответствуют широким и низким усилениям, такие швы нежелательны по тем же причинам, что и швы с чрезмерно большим значением $\Psi_{пр}$, а также в связи с возможным уменьшением сечения шва по сравнению с сечением основного металла из-за колебаний уровня жидкой ванны.

Если полученные в расчете размеры шва удовлетворяют поставленным требованиям, то аналогично рассчитывают режим сварки с другой стороны. При необходимости производят корректировку режима сварки.

2.2. Расчет режимов сварки и размеров шва стыковых соединений с зазором и разделкой кромок

Последовательность расчета режимов сварки швов стыковых соединений с зазором и со скосом кромок аналогична предыдущему. Однако наличие разделки и зазоров влияют главным образом на соотношение долей участия основного и наплавленного металла, а контур провара и общая высота шва C при неизменном режиме сварки остаются практически неизменными, т.е. $C = H + g = \text{const.}$

Поэтому для расчетов режима сварки и размеров шва стыковых соединений с зазором и разделкой кромок применяют следующую последовательность работ:

1) Определяют режим сварки и размеры шва по формулам (2.1 - 2.26), как для соединений без разделки кромок и без зазора.

Глубину провара H при сварке первым проходом в многопроходном шве назначают обычно из условия полного провара притупления. При применении флюсовой, флюсомерной подушек, медного ползуна, остающейся подкладки учитывают вырезание (2.2), а если соединение двустороннее, то выражения (2.4 и 2.5).

2) Определяют количество наплавленного металла, необходимое для образования валика заданных размеров F'' . В общем случае оно равно (рис. 2.2, а)

$$F'' = F_{н} - 2F' - F'' = F_{н} - h^2 \cdot \text{tg} \frac{\alpha}{2} - C \cdot b, \quad (2.29)$$

где $F_{н}$ - количество наплавленного металла на рассчитанном режиме по формуле (2.25),
 F' , F'' , F''' - количество наплавленного металла, идущее, соответственно, на заполнение разделки, зазора и усиления шва.

3) Определяют высоту усиления g' при наличии разделки и зазора (рис. 2.2, а)

$$g' = \frac{F''}{0,73e - b} = \frac{F_{н} - Cb - h^2 \text{tg} \frac{\alpha}{2}}{0,73e - b}. \quad (2.30)$$

При наличии лишь зазора и отсутствии разделки ($h = 0$) (рис. 2.2, б)

$$g' = \frac{F_H - C \cdot b}{0,73e - b} \quad (2.31)$$

При наличии разделки и отсутствии зазора ($b = 0$) (рис. 2.2, в)

$$g' = \frac{F_H - h^2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{0,73e} \quad (2.32)$$

4) Определяют H' .

$$H' = C - g' \quad (2.27')$$

Полученное значение H' сопоставляют с заданным (п.1, раздел 2.2) и при значительных отклонениях корректируют режим сварки.

2.3. Расчет режима сварки и размеров многопроходных швов стыковых соединений с разделкой кромок

Если шов стыкового соединения с разделкой кромок выполняют за несколько проходов, то первоначально определяют режим сварки первым проходом.

1) Устанавливают требуемую глубину проплавления притупления.

При сварке односторонних швов глубину провара устанавливают в зависимости от примененного приема для формирования корня шва, предотвращающего образование прожогов, но не менее величины притупления C , мм.

При двухсторонней сварке требуемая глубина провара H'_0 устанавливается в соответствии с формулами (2.4, 2.5), подставляя в них значение c вместо S (рис. 2.3).

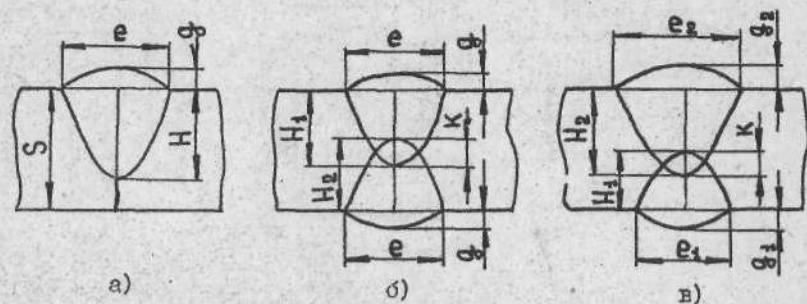
2) Выбирают для первого прохода диаметр электродной проволоки (табл. 2.2), задаваясь j .

3) Рассчитывают величину сварочного тока $I_{св}$ (А):

$$I_{св} = \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} \cdot j \quad (2.33)$$

где j - допустимая плотность тока в электроде (A/mm^2), которую уменьшают для обеспечения благоприятной формы провара и снижения вероятности образования кристаллизационных

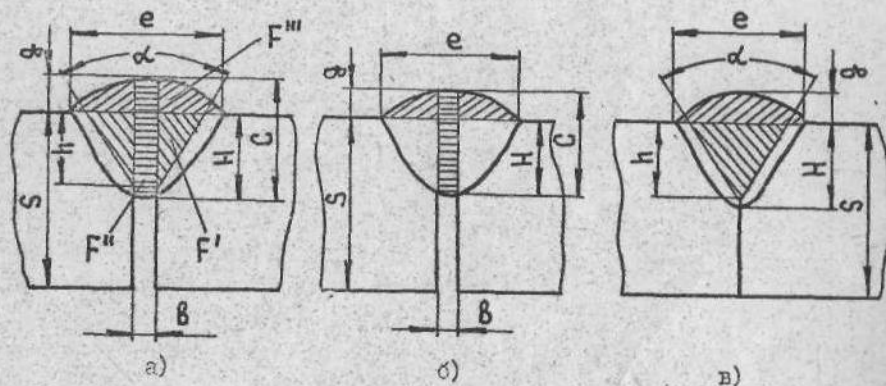
Стыковой шов



а - односторонний на весу;
б - двухсторонний асимметричный;
в - двухсторонний симметричный.

Рис. 2.1.

Изменение размеров шва при наличии:



а - разделки и зазора;
б - зазора;
в - разделки.

Рис. 2.2.

трещин (берут значения, близкие к минимальному пределу допустимых плотностей тока, табл. 2.2.).

4) Рассчитывают режим сварки первым проходом и размеры шва по формулам (2.9 - 2.28).

5) Определяют высоту усиления g'_0 (рис. 2.3) по формуле (мм):

$$g'_0 = \sqrt{\frac{F_H - C' \cdot b}{\operatorname{tg} \alpha / 2}}, \quad (2.34)$$

где F_H - площадь поперечного сечения металла, наплавленного за данный проход, определяется по формуле (2.25), мм².

6) Определяют H'_0 .

$$H'_0 = C' - g'_0. \quad (2.27'')$$

Полученное значение H'_0 сопоставляют с заданным (п. I, раздела 2.3) и при значительных расхождениях корректируют режим сварки.

7) Выбирают режим сварки первым проходом с другой стороны шва, исходя из условия обеспечения провара притупления (рис. 2.3), т.е.

$$H'_0 + H''_0 = c + k, \quad (2.35)$$

где c - величина притупления,
 k - перекрытие.

Обычно режим сварки первым проходом с обеих сторон шва назначают одинаковым.

8) Рассчитывают режим сварки последующих проходов и размеры шва по формулам (2.7 - 2.24) и из условия максимальной производительности и минимального числа проходов. Кроме того, соблюдают условия заполнения разделки и плавного сопряжения шва с основным металлом. Если при выполнении последних проходов окажется, что шов не перекрывает разделку, то их выполняют в два прохода.

Скорость сварки $V_{св}$ рассчитывают из условий обеспечения равенства (2.10) и необходимого количества наплавленного металла за один проход ($F_H^{посл}$) по формуле (см/с):

$$V_{св} = \frac{\alpha_n \cdot I_{св}}{3600 \cdot \gamma \cdot (F_H^{посл})'}, \quad (2.36)$$

где размерности всех величин те же, что и в формуле (2.25). При этом максимальное сечение одного прохода не должно превышать 100 мм².

9) Определяют площадь поперечного сечения последующих проходов при двухсторонней сварке (см²) с первой стороны шва (рис. 2.3)

$$F_H^{посл} = (h - g'_0) [b + (h + g'_0) \cdot \operatorname{tg} \alpha / 2] + 0,73 e_1 g_1; \quad (2.37)$$

со второй стороны шва (рис. 2.3)

$$F_H^{посл} = (h - g''_0) [b + (h + g''_0) \cdot \operatorname{tg} \alpha / 2] + 0,73 e_2 g_2, \quad (2.38)$$

где g''_0 - определяется аналогично g'_0 :

$$g''_0 = \sqrt{\frac{F_H - C'' \cdot b}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}}. \quad (2.39)$$

В формулах (2.34 - 2.38) b, c, h, α - размеры разделки кромок, e, e_1, e_2, g, g_1, g_2 - размеры усиления шва по чертежу, ГОСТ или ТУ.

В случае, если со стороны разделки производится ручная подварка, $F_H^{посл}$ определяют по формуле (2.37), подставив в нее вместо g'_0 величину ($Z - c$), полученную из рис. 1.2.

10) Определяют число последующих проходов, выполняемых на одном режиме, с каждой стороны шва.

$$n = \frac{F_H^{посл}}{(F_H^{посл})'}, \quad (2.40)$$

где $(F_H^{посл})'$ - площадь поперечного сечения наплавленного металла за один проход (формула 2.36).

2.4. Расчет режима сварки и размеров шва тавровых и угловых соединений

Режим сварки угловых швов тавровых и угловых соединений, свариваемых в лодочку, с некоторым приближением можно определить так же, как для стыковых соединений с углом разделки $\alpha = 90^\circ$ (рис. 2.4). Однако при его выборе необходимо учитывать некоторые

специфические особенности формирования угловых швов, а именно: при получении плоских или выпуклых швов ширина шва всегда должна быть равна расстоянию по горизонтали между свариваемыми деталями (рис. 2.4,а). Если ширина шва будет больше этого расстояния, то неизбежны подрезы (рис. 2.4,б). Поэтому коэффициент формы углового шва, равный отношению ширины шва к общей высоте его ($\Psi = e/C$) должен быть не больше 2. Вместе с тем слишком глубокие и узкие швы (с малым коэффициентом формы) склонны к образованию горячих трещин из-за неблагоприятных условий кристаллизации.

Практикой установлено, что угловые швы удовлетворительно формируются на режимах, при которых плотность тока в электроде находится в пределах средних значений, указанных в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Допустимые плотности тока при сварке угловых швов

Диаметр электрода, мм	2	3	4	5
Допустимая плотность тока j , А/мм ²	60 +150	45+85	35+55	30+40

С учетом указанного расчет режима ведут в следующей последовательности:

1) Определяют площадь поперечного сечения наплавленного металла при получении плоского шва, зная катет шва K (указывается в чертеже конструктором), по формуле:

$$F_H = \frac{K^2}{2} \quad (2.4I)$$

2) Выбирают диаметр электрода. При его выборе необходимо иметь в виду, что угловые швы с катетом 3-4 мм можно получить лишь при использовании электродной проволоки диаметром не более 2 мм; минимальный катет 5-6 мм обеспечивается при сварке электродной проволокой диаметром 3-5 мм. Сварочную проволоку диаметром более 5 мм, затрудняющую провар вершины углового шва, применять не рекомендуется.

3) Для принятого диаметра электрода по табл. 2.6 подбирают плотность тока и по формуле (2.33) определяют сварочный ток.

К определению g'_0 , H'_0 и $F_H^{посл}$ при многослойной сварке

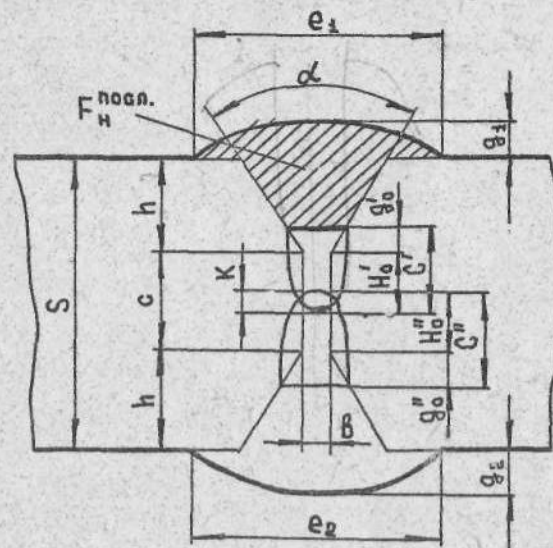
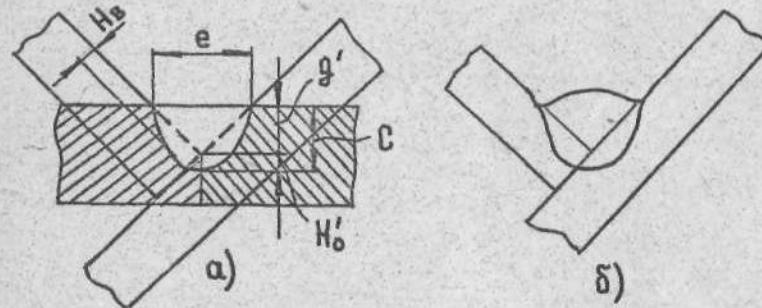


Рис. 2.3

Формирование углового шва при сварке в лодочку



а) - удовлетворительное,
б) -- подрезы.

Рис. 2.4

4) Рассчитывают по формулам (2.17 - 2.23) коэффициент наплавки σ_n .

5) Определяют по формуле (2.25) скорость сварки, обеспечивающую при данной величине сварочного тока требуемую площадь наплавки F_n .

6) Рассчитывают критический ток (рис. 2.5) для определения формы поверхности шва (плоская, вогнутая или выпуклая) по формуле:

$$I_{кр} = I_0 + m U_{св} . \quad (2.42)$$

где $I_{кр}$ - критический сварочный ток, т.е. такой ток, при котором для данной скорости сварки получается шов с плоской поверхностью;

I_0 - условный критический ток при нулевой скорости сварки, для механизированной сварки $I_0 = 350$ А;

m - коэффициент, характеризующий наклон прямой (табл. 2.7).

Таблица 2.7

Коэффициент m в зависимости от диаметра электрода

Диаметр электрода, мм	2	3	4	5
m , А ч/м	2	4,5	7	10

Если $I_{св} = I_{кр}$, то получается шов с плоской поверхностью; если $I_{св} < I_{кр}$ - шов с вогнутой поверхностью; если $I_{св} > I_{кр}$ - шов с выпуклой поверхностью.

7) По формуле (2.9) находят напряжение дуги и по (2.12) - коэффициент формы провара. При этом необходимо иметь в виду, что напряжение дуги следует выбирать ближе к нижнему пределу диапазона оптимальных значений.

8) По формуле (1.10), принимая значения $\eta_{ц}$ из п.6 раздела 2.1, определяют погонную энергию q_n .

9) Определяют основные размеры шва при сварке стыкового бескосного соединения на принятом режиме: глубину провара H по формулам (2.13 - 2.15), ширину шва e и высоту валика g по (2.16 и 2.26), общую высоту шва C по (2.27). При этом e

должна равняться расстоянию по горизонтали между свариваемыми деталями.

10) Определяют коэффициент формы углового шва

$$\psi = \frac{e}{C} , \quad (2.43)$$

который должен быть не больше 2.

11) Полагая, как и в предыдущих случаях, что полученное значение C является общей высотой и углового шва, определяют высоту заполнения разделки g' по формуле (2.32). При отсутствии зазора ($\beta = 0$) и $\alpha = 90^\circ$

$$g' = \sqrt{F_n} . \quad (2.44)$$

Тогда глубину проплавления H'_0 определяют по формуле (рис.2.4)

$$H'_0 = C - g' . \quad (2.45)$$

12. Определяют глубину проплавления вертикальной стенки

$$H_B = (0,8 - I,0) H'_0 . \quad (2.46)$$

Если предъявляется требование обеспечить сплошной провар стенок тавра, а при максимально допустимой плотности тока обеспечить требуемую глубину проплавления невозможно, то прибегают к разделке кромок.

При расчете режимов сварки угловых швов следует учитывать, что хорошее формирование шва без наплывов на горизонтальную плоскость и подрезов вертикального листа получается при катете шва не более 8 - 9 мм. Швы с большими катетами выполняются за несколько проходов: при катете 9 - 14 мм - за два прохода; 15 - 16 мм - за три, 17 - 20 мм - за четыре.

3. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ НЕЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

3.1. Выбор критериев для расчетного определения режимов сварки

Низкоуглеродистые нелегированные стали имеют очень высокую

критическую скорость охлаждения при закалке и поэтому в зонах термического влияния (ЗТВ) сварных соединений этих сталей упомянутого общего повышения твердости не наблюдается. Свойства сварных соединений таких сталей в основном определяются степенью развития рекристаллизации и огубления структуры околосварной зоны и шва. Поэтому в качестве основного расчетного критерия определения режимов сварки используют скорость охлаждения $\dot{W}_{\text{охла.}}$ внутри некоторого оптимального интервала $\Delta W_{\text{опт.}}$ (табл. 3.1), который обычно устанавливается по данным валиковой пробы таким образом, чтобы ударная вязкость в ЗТВ при отрицательных температурах была не ниже 30 дж/см^2 .

Аналогичны указанным сталям стали низколегированные низкоуглеродистые типа 09Г2, 10Г2У. Хотя в этих сталях повышенное содержание марганца снижает критическую скорость охлаждения и пониженное содержание углерода в них предопределяет практически отсутствие мартенситного распада.

Несколько иначе ведут себя при сварке стали 10Г2СД, 15ХСНД, 17ГС и им подобные низколегированные с повышенным содержанием марганца, хрома и других легирующих элементов при содержании углерода 0,15 % и более. В этих сталях вследствие наличия карбидов с более высокой устойчивостью, чем цементит, при наличии повышенного количества углерода, начинает сказываться эффект образования неомогенного аустенита при сварочном нагреве и при охлаждении - образование бейнита и мартенсита. Поэтому сварку таких сталей лучше выполнять на режимах, обеспечивающих скорость охлаждения металла, близкую к нижней границе интервала $\Delta W_{\text{опт.}}$, то есть при повышенных значениях погонной энергии. Указанные ограничения касаются в основном металла больших толщин (свыше 25 - 30 мм), так как при малых толщинах, даже если в ЗТВ образуется мартенсит, количество его настолько мало, что не оказывает практически влияния на свойства: твердость ЗТВ этих сталей не превышает НВ 220.

Большого внимания требует сварка низколегированных сталей с карбонитридным упрочнением типа 16Г2АФ, 18Г2АФ и др. Принцип легирования этих сталей и создания в них повышенной прочности и вязкости основан на упрочнении феррита марганцем, образовании дисперсной упрочняющей фазы на базе имеющихся в стали азота, углерода, ванадия и получения очень мелкого зерна за счет ограничивающих его рост не растворяющихся при нагреве нитридов (алюминия, частично ванадия

и др.), которые также служат центрами кристаллизации во время перекристаллизации при охлаждении. Упрочняющая дисперсия карбонитридная фаза выделяется и упрочняет феррит в процессе охлаждения. Таким образом в сталях рассмотренного типа наличие дисперсной фазы позволяет повысить прочность, а получение мелкого зерна (бвали 10-12) способствует повышению вязкости и хладостойкости.

Условия обеспечения высокой прочности и вязкости требуют сохранения упрочняющей фазы в дисперсном состоянии и сохранения мелкого зерна. Повышение погонной энергии и соответственно увеличение времени пребывания при высоких температурах в принципе может увеличить степень коагуляции упрочняющей фазы и повысить степень ее растворения, а также рост зерна. Вследствие этого прочность и вязкость ЗТВ при сварке на повышенных значениях погонной энергии могут снижаться. Поэтому при расчете режимов сварки этих сталей следует ориентироваться на скорости охлаждения металла, близкие к верхней границе интервала $\Delta W_{\text{опт.}}$ установленного по пробе ИМЕТ-1 (табл. 3.1).

Стремление к уменьшению веса сварных конструкций и изделий привело к использованию низколегированных сталей в термически улучшенном состоянии - после закалки и высокого отпуска при температурах 550 - 670 °С. В таком состоянии применяют, например, стали 10ХСНД, 17ГС, 16Г2АФ, 18Г2АФ и др. Сварка термически упрочненных сталей осложняется тем, что в ЗТВ, там где нагрев происходит до температуры, близкой к A_1 , происходит некоторое разупрочнение. Степень его тем больше, чем выше прочность закаленной и отпущенной стали перед сваркой и чем больше погонная энергия при сварке. Поэтому сварку термически улучшенных сталей предпочтительно выполнять с малым временем пребывания металла при высокой температуре, то есть на режимах, обеспечивающих скорость охлаждения металла, также близкую к верхней границе интервала $\Delta W_{\text{опт.}}$ (табл. 3.1).

3.2. Последовательность расчета режимов сварки

Расчет режимов сварки низкоуглеродистых и низкоуглеродистых низколегированных сталей производится в следующей последовательности.

1) Рассчитывают параметры режима сварки исходя из условия получения швов с оптимальными размерами и формой по методике, изложенной в разделах 1,2.

Таблица 3.1

Оптимальный интервал скоростей охлаждения при сварке по данным изменения структуры и свойств сталей в околошовной зоне

Сталь	Оптимальный интервал скорости охлаждения		По какой пробе выбран	Количество мартенсита, %	HB, со-ответствующая пределам
	По каким свойствам взят	По какой пробе выбран			
	$^{\circ}\text{C}/\text{с}$				
	$\Delta W_{\text{опт.}}$				$\Delta W_{\text{опт.}}$
1	2	3	4	5	6
Ст.2	6-18	$a_n \geq 50 \text{ Дж/см}^2$ (при -60 $^{\circ}\text{C}$)	Валиковая (S = 20 мм)	-	155-170
Ст.3 кп	1,2-12	$a_n \geq 20$ (при -50 $^{\circ}\text{C}$)	Валиковая (S = 12)	-	-
МСт.5	0,12-40	$a_n \geq 20$	ИМЕТ-I	-	130-190
✓ Б Ст.3	1,4-15	$a_n \geq 50$ (при -50 $^{\circ}\text{C}$)	Валиковая (S = 12)	-	155-165
✓ 09Г2	1,0-15,0	$a_n \geq 80$ (при -60 $^{\circ}\text{C}$)	Валиковая (S = 12)	-	215-185
10Г2У	0,7-3,8	$a_n \geq 40$ (при -60 $^{\circ}\text{C}$)	Валиковая (S = 10)	-	205-180
14Г2	1,0-1,2	$a_n \geq 20$ (при -70 $^{\circ}\text{C}$)	Валиковая (S = 20)	-	255-270
18Г2АФ	0,1-12	$\psi \geq 35$, $\sigma \geq 17$	ИМЕТ-I	0-30	190-275
✓ 16ГС	1,0-12,0	$a_n \geq 20$ (при -60 $^{\circ}\text{C}$)	Валиковая (S = 20)	-	190-225
17ГС	10 - 30	$a_n \geq 40$ (при -60 $^{\circ}\text{C}$)	Валиковая (S = 11)	-	225-235
10Г2СД	1,0-15	$a_n \geq 20$ (при -60 $^{\circ}\text{C}$)	Валиковая (S = 12)	-	185-250
14ХГС	2,4-16	$a_n \geq 40$ (при -70 $^{\circ}\text{C}$)	Валиковая (S = 20)	-	200-225
12ХГН	1,2-52	$a_n \geq 30$ (при -60 $^{\circ}\text{C}$)	Валиковая (S = 16)	-	170-240
14ХГ2	1,2-5,5	$a_n \geq 20$ (при -50 $^{\circ}\text{C}$)	Валиковая (S = 20мм)	-	325-335
✓ 10ХСНД	0,8-15	$a_n \geq 12,0$ (при +20 $^{\circ}\text{C}$)	Валиковая (S = 18)	-	250-275
✓ 15ХСНД	1,8-9,0	$a_n \geq 7$ (при +20 $^{\circ}\text{C}$)	Валиковая (S = 12)	-	230-250

2) По известной погонной энергии рассчитанного режима сварки определяют фактическую скорость охлаждения околошовной зоны при температуре наименьшей устойчивости аустенита ($T_m = 500-600$ $^{\circ}\text{C}$).

Расчет фактической скорости охлаждения околошовной зоны производят на основе теории распространения тепла при сварке, разработанной академиком Н.И.Ризкиным по следующим формулам: при наплавке валика на массивное тело

$$w_{\text{охл.}} = 2\pi\lambda \frac{(T_m - T_0)^2}{q_n}, \quad (3.1)$$

при односторонней сварке листов стык со сквозным проплавлением

$$w_{\text{охл.}} = 2\pi\lambda c\gamma \frac{(T_m - T_0)^3}{(q_n/S)^2}, \quad (3.2)$$

где $w_{\text{охл.}}$ - мгновенная скорость охлаждения при температуре T_m , $^{\circ}\text{C}/\text{с}$;

λ - коэффициент теплопроводности, кал/см \cdot с \cdot $^{\circ}\text{C}$; = 0,09

$c\gamma$ - объемная теплоемкость, кал/см 3 \cdot $^{\circ}\text{C}$; = 1,2

T_0 - начальная температура изделия, $^{\circ}\text{C}$;

S - толщина свариваемого металла, см;

q_n - погонная энергия (кал/см), определяется в соответствии с п.6 раздела 2.1.

Для приближения расчетной схемы к действительным условиям ввода тепла в изделие при сварке I-го слоя шва необходимо для погонной энергии q_n и толщины металла S при расчете по формулам (3.1) и (3.2) ввести поправочные коэффициенты K_1 и K_2 , учитывающие влияние конструкции соединения (табл.3.2).

Таблица 3.2

Коэффициенты приведения

Приводимая величина	Первый слой стык: угол разделки 60 $^{\circ}$	Наплавка, одно-: Первый слой	
		посходная сварка: при соеди-: нении тавро-: вом, неизвестно-: ном	
Погонная энергия (коэфф. K_1)	3/2	I	2/3
Толщина металла (коэфф. K_2)	3/2	I	I

$K_1, K_2 = 1,5$

Для расчета скорости охлаждения металла при сварке I-го слоя шва следует подставить в формулы (3.1, 3.2) не истинные значения погонной энергии q_n и толщины металла S , а приведенные

$$q_{п. прв.} = K_1 q_n ; S_{прв.} = K_2 S. \quad (3.3)$$

3) Рассчитанную фактическую скорость охлаждения с учетом ограничений для данной марки стали, изложенных в п.3.1, сравнивают с диапазоном оптимальных скоростей охлаждения по табл.3.1. Если фактическая скорость охлаждения находится вне диапазона оптимальных скоростей, то необходимо сделать перерасчет режима сварки с целью изменения погонной энергии и скорости охлаждения, например, изменить сварочный ток и скорость сварки, вместо однопроходной сварки применить многопроходную и т.д.

При этом необходимо, чтобы новый режим сварки обеспечивал и нормальное формирование шва.

4. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ ЗАКАЛИВАЮЩИХСЯ СТАЛЕЙ

К сталям, закалывающимся в условиях сварки, могут быть отнесены углеродистые и легированные стали. Примерами марок закалывающихся сталей могут служить 35X, 40X, 45X, 35Г2, 40Г2, 50Г2, 30ХГТ, 30ХГНА, 30ХГСА и др. По чувствительности к термомеханическому циклу сварки к этой группе сталей можно отнести углеродистые стали марок 30, 35, 40, 45, 50 и др., а также теплоустойчивые стали марок 15М, 15ХМА, 20ХМ, 20ХМА, 12Х1МФ, 15Х1МФ, 12Х5МА, 20Х2МА, 30ХМА и др.

К группе закалывающихся сталей относятся также высоколегированные хромистые стали мартенситного и мартенситно-ферритного классов 12Х13, 15Х12ВМФ и др.

4.1. Критерии расчетного определения режимов сварки

Выбор критериев для расчета режимов дуговой сварки указанной выше группы сталей определяется типом стали и конструкции, условиями ее эксплуатации и характером термической обработки до и после сварки.

Если сталь перед сваркой подвергается термообработке (нормализации или закалке с отпуском), а после сварки отпуск невозможен из-за больших габаритных размеров конструкции, то в качестве основного критерия расчета параметров технологии и режимов наиболее производительных методов однопроходной и многослойной сварки длинными участками принимают скорость охлаждения $W_{охл}$ околошовной зоны внутри интервала скоростей охлаждения $\Delta W_{опт}$ (табл.4.1), в котором достигается оптимальное сочетание механических свойств в ЗТВ и шве. Чтобы предупредить опасность образования холодных трещин, скорость охлаждения $W_{охл}$ следует назначать с учетом допустимых скоростей охлаждения W_g (табл. 4.2), которая в зависимости от типа стали и жесткости сварного соединения может в большей или меньшей мере ограничивать диапазон приемлемых скоростей охлаждения внутри интервала $\Delta W_{опт}$.

Если сталь перед сваркой подвергается термообработке, а после сварки - отпуску для снятия напряжений и выравнивания механических свойств сварного соединения с целью обеспечения его равнопрочности с основным металлом или сталь перед сваркой подвергается отжигу, а после сварки - полной термической обработке на сверхвысокую прочность 1600-2000 МПа (закалке с низким отпуском), то в качестве основного критерия при расчете параметров режимов однопроходной или многослойной сварки длинными участками принимают предельно допустимую скорость охлаждения W_g (табл. 4.2), гарантирующую отсутствие трещин в околошовной зоне и шве.

При сварке стали со средней устойчивостью аустенита выбранный по W_g режим часто требует корректировки для получения заданных механических свойств. В этом случае дополнительным критерием служит интервал скоростей охлаждения $\Delta W_{опт}$ (табл.4.1), в котором обеспечиваются оптимальные механические свойства в околошовной зоне и других участках соединения до и особенно после отпуска.

4.2. Последовательность расчета режимов сварки

1) Рассчитывают параметры режима сварки, исходя из условия нормального формирования шва по методике, изложенной в разделах I и 2.

2) Определяют по формулам (3.1, 3.2) фактическую скорость охлаждения околошовной зоны при температуре наименьшей устойчивости аустенита.

Таблица 4.1

Оптимальный интервал скоростей охлаждения при сварке по данным изменения структуры и свойств стали в околошовной зоне

Сталь	Оптимальный интервал скоростей охлаждения			Количество в мертен-сита, %	Твердость НВ, соответствующая пределам
	$\Delta W_{охл.}$, °C/c	По каким свойствам выбран (при + 20°C)	По какой пробе выбран		
1	2	3	4	5	6
35	0,12-7,0	$a_n \geq 20 \frac{Дж}{см^2}$	ИМЕТ-I	0-30	136-200
✓ 40	2,4-5,0	$a_n \geq 60$	Валиковья (S = 16 мм)	-	265-280
45	2,0-4,0	$a_n \geq 35$	"	5	230-250
40X	4,0-14,0	$a_n \geq 50$	"	75-90	340-460
✓ 12НХ	2-100	$\psi \geq 40$	ИМЕТ-I	0-50	156-275
30ХМА	0,1-10	$\psi \geq 30$; $\delta \geq 12$	"	0-15	190-250
35ХМ	1-5	$\psi \geq 25$	-У-	0-40	230-340
40ХМА	$\leq 0,7$	$\psi \geq 20$	"	50	
25НЭ	0,8-70	$a_n \geq 50$	Валиковья (S = 16 мм)	0-100	175-455
20ХГСА	1,6-70	$\psi \geq 25$	ИМЕТ-I	0-100	250-420
25ХГСА	0,07-1,3	$\psi \geq 20$	"	-	170-250
✓ 30ХГСА	1,6-6,0	$\psi \geq 22$	"	0-80	345-450
35ХГСА	1,5-7,0	$a_n \geq 50$	Валиковья (S = 16 мм)	30-90	400-450
20Х2МФ	1-25	$\psi \geq 40$	ИМЕТ-I	0-30	270-425
X5M	0,8-8,0	$\psi \geq 25$	"	-	340-370
15Х11МФ	≤ 40	$\psi \geq 20$	"	0-100	395
15Х12ВМФ	≤ 25	$\psi \geq 12$	-У-	0-100	395
12Х13	не ограничивается	$\psi \geq 17$	"	0-100	380

Таблица 4.2

Допустимые скорости охлаждения при сварке по данным испытаний на сопротивляемость образованию холодных трещин

Сталь	Проба СТС		Крестовая проба			
	Допустимая скорость охлаждения, °C/c	Допустимое количество мертен-сита, %	Конус тмз	Допустимая скорость охлаждения, °C/c	Допустимое количество мертен-сита, %	Допустимая твердость
	w_g , °C/c	%	НВ	w_g , °C/c	%	НВ
45	15	80	400	8	30	375
40X	5,5	80	470	2,5*	55	390
35ХМ	15	70	430	-	-	-
40ХМА	-	-	-	5*	90	467
25НЭ	36	90	455	24	85	435
20ХГСА	-	-	-	6	30	310
30ХГСА	5,5	-	440	2*	20	390
35ХГСА	5,5	90	440	2*	70	390
20Х2МФ	15	20	420	-	-	-
15Х11МФ	25*	100	390	-	-	-
15Х12ВМФ	25*	100	380	-	-	-
12Х13	15	100	380	-	-	-

Примечание: 1. Отмечены * w_g при условии сопутствующего подогрева не ниже 250 °C для стали 40ХМА, не ниже 200 °C для сталей типа Х1? и не ниже 100 °C для сталей 40Х, 30ХГСА.

2. Сталь, для которой w_g не указаны, практически не склонна к образованию трещин в пределах $\Delta W_{опт.}$

3) Результаты расчета сравнивают с данными о допустимых скоростях охлаждения околошовной зоны.

Если в результате расчета окажется, что скорость охлаждения основного металла w охл выше допустимой скорости охлаждения w_g или же находится вне диапазона оптимальных скоростей для данной марки стали, то производится перерасчет параметров режима сварки с целью изменения погонной энергии сварки.

В случае, когда изменением погонной энергии нельзя обеспечить требуемые скорости охлаждения, основной металл перед сваркой или в процессе сварки должен быть подогрет. Температуру предварительного подогрева T_0 находят по формулам (3.1, 3.2). При их использовании вместо w охл подставляют допустимую скорость охлаждения w_g .

5. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ

В высоколегированных хромоникелевых аустенитных сталях под влиянием термического цикла сварки могут протекать процессы, в результате которых произойдет потеря стойкости металла шва и околошовной зоны против коррозии. Возможность появления межкристаллитной коррозии (МКК) зависит от температуры и времени выдержки. Наименьшее время выдержки, необходимое для возникновения склонности металла к МКК, лежит в температурном интервале 680 - 780 °С. Поэтому в качестве критерия расчетного определения режимов сварки аустенитных сталей используют критическое время выдержки $t_{кр}$ в указанном интервале температур (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Критическое время $t_{кр}$ для различных марок стали

Марка стали	Критическое время, кр. о
1	2
1. 12X18H9	20
2. 08X28H10	40
3. 06X18H11	200
4. 04X18H10	1500

Продолжение табл. 5.1

1	2
5. 12X18H9T	3600
6. 10X24H19	1000
7. 08X25H20	10000
8. 12X25H20Б	10000

Последовательность расчета при этом следующая:

1) Рассчитывают режим сварки исходя из условия нормального формирования шва по методике, изложенной в разделах 1 и 2. При этом следует иметь в виду, что эти стали обладают большим удельным электрическим сопротивлением, поэтому допускаемая плотность тока при сварке аустенитными электродами должна быть меньше, чем при сварке низкоуглеродистыми электродами.

2) Определяют фактическую скорость охлаждения и время выдержки металла шва и околошовной зоны в опасном интервале температур. Это время пребывания металла шва и околошовной зоны в опасном интервале температур сопоставляют с критическим значением, т.е. минимальным временем выдержки, которое вызовет возникновение склонности к межкристаллитной коррозии.

Время пребывания металла шва и околошовной зоны в опасном интервале температур можно определить по формуле:

$$t_{ом} = (780 - 680) / w_0, \quad (5.1)$$

где w_0 - среднее значение скорости охлаждения в интервале температур 780 - 680 °С.

Игноренную скорость охлаждения при $T = 780$ °С (w охл.780) и $T = 680$ °С (w охл. 680) в условиях сварки можно определить по формулам (3.1, 3.2) с учетом выражения 3.3, подставив в них вместо T_m соответственно температуры 780 °С и 680 °С.

Средняя скорость охлаждения

$$w_0 = (w \text{ охл. } 780 + w \text{ охл. } 680) / 2. \quad (5.2)$$

Для сохранения стойкости к МКК должно соблюдаться следующее неравенство:

$$t_{кр} > 2,1 t_{ом1} + 1,74 \sum_1^n t_{оп}, \quad (5.3)$$

где $t_{кр}$ - критическое время, определенное по табл. 5.1;
 $t_{ом1}$ - время пребывания в области опасных температур того слоя шва, стойкость которого определяется;
 $\sum_1^n t_{оп}$ - суммарное время пребывания в области опасных температур, определяемое суммой соответствующих времен воздействия всех термических циклов сварки (при многослойной сварке) на слой шва, стойкость которого определяется.

6. РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ОЖИДАЕМЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ШВА

При выборе или расчете режима сварки необходимо обеспечивать не только показатели сплошности, правильного формирования, отсутствия дефектов, устойчивости и производительности процесса, но и способствовать получению благоприятных структур и механических свойств металла шва и ЗТВ.

На основании изучения всех факторов, влияющих на механические свойства металла шва: доли участия основного металла в формировании шва и его химического состава, типа и химического состава сварочных материалов, метода и режима сварки, типа соединения и числа проходов в сварном шве, размеров сварного соединения, величины пластических деформаций растяжения в металле шва при его остывании - разработаны приближенные способы оценки ожидаемых механических свойств, многократная проверка которых показала, что расчетные характеристики металла шва по сравнению с экспериментальными определяются с точностью $\pm 10 - 15 \%$.

6.1. Расчет механических свойств металла шва при сварке низкоуглеродистых сталей

При сварке низкоуглеродистых сталей химический состав металла шва, характеризуемый эквивалентным содержанием углерода $C_{эш}$, незначительно отличается от химического состава основного металла, характеризуемого также эквивалентным содержанием углерода $C_{эо}$.

Для этих сталей $C_{эо} = 0,21 - 0,35 \%$ и $C_{эш} = 0,20 - 0,30 \%$. Механические свойства металла шва зависят в основном только от скорости его охлаждения и пластических деформаций растяжения, возникающих в металле шва при его остывании.

С увеличением скорости охлаждения металла шва вместо сравнительно мягких равновесных структур ферритно-перлитной стали происходит образование неравновесных, мелкодисперсных структур сорбита, тростита и бейнита, что приводит к заметному повышению прочности и уменьшению пластичности металла шва.

Для определения механических свойств металла шва при сварке низкоуглеродистых сталей поступают следующим образом. Зная механические свойства основного металла и режим сварки, рассчитывают скорость охлаждения по графику (рис. 6.1) определяют безразмерные коэффициенты $f(НВ)$, $f(\sigma_b)$, $f(\sigma_T)$ и $f(\psi)$, и определяют ожидаемые механические свойства металла шва по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{бш} &= f(\sigma_b) \cdot \sigma_{б0}; & \sigma_{Тш} &= f(\sigma_T) \cdot \sigma_{Т0}; \\ \psi_{ш} &= f(\psi) \cdot \psi_0; & НВ_{ш} &= f(НВ) \cdot НВ_0; \\ \delta_{ш} &= 0,43 \psi_{ш}, \end{aligned} \right\} (6.1)$$

где $\sigma_{бш}$, $\sigma_{Тш}$, $\psi_{ш}$, $\delta_{ш}$, $НВ_{ш}$ - предел прочности, предел текучести, относительное поперечное сужение, относительное удлинение, твердость металла шва, $\sigma_{б0}$, $\sigma_{Т0}$, ψ_0 , $НВ_0$ - соответствующие характеристики основного металла.

6.2. Расчет механических свойств металла шва при сварке легированных сталей

Для легированных сталей необходимо более точно учитывать химический состав металла шва. Изучая комплексное легирование металла шва с пределом легирования: $C \leq 0,3 \%$; $Si \leq 1,0 \%$; $Mn \leq 2,5 \%$; $Cr \leq 3,0 \%$; $Ni \leq 3,0 \%$; $Mo \leq 1,0 \%$; $Cu \leq 3,0 \%$; $Al \leq 0,75 \%$; $Ti \leq 0,35 \%$; $W \leq 2,0 \%$, установлено, что для данного диапазона легирования изменение механических свойств металла шва пропорционально концентрации легирующих элементов и что при комплексном их легировании действие всех элементов подчиняется закону аддитивности.

Влияние тока и скорости сварки на форму поверхности угловых швов

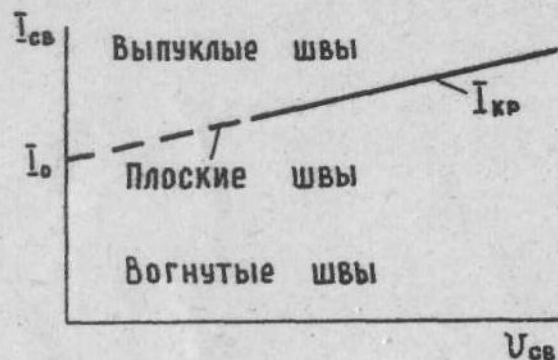


Рис. 2.5

Изменение относительных характеристик механических свойств металла шва в зависимости от скорости его охлаждения

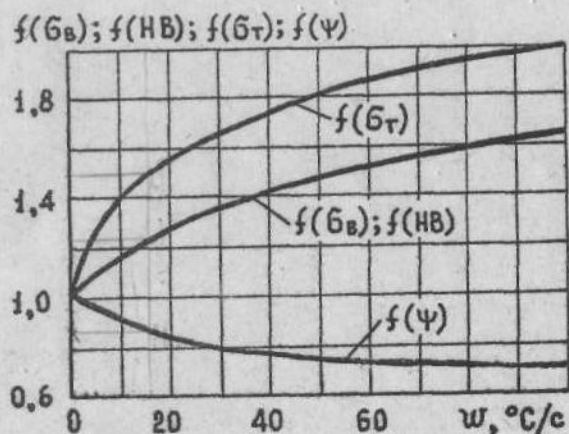


Рис. 6.1

Непосредственное определение механических характеристик металла шва установило коэффициенты влияния каждого элемента и позволило составить эмпирические уравнения для расчета ожидаемых механических характеристик металла сварных низколегированных швов в следующем виде:

для предела прочности шва, кгс/мм²

$$\sigma_{вш} = 4,8 + 50C + 25,2Mn + 17,5Si + 23,9Cr + 7,7Ni + 8,0W + 70Ti + 17,6Cu + 29Al + 16,8Mo, \quad (6.2)$$

для относительного удлинения шва, %

$$\delta_{ш} = 50,4 - (21,8C + 15Mn + 49Si + 2,4Ni + 5,8Cr + 6,2Cu + 2,2W + 6,6Ti) + 17,1Al + 2,7Mo, \quad (6.3)$$

для ударной вязкости шва при $T = 20^\circ\text{C}$, кгс.м/см²

$$\alpha_{нш} = 23,3 - (25,7C + 6,4Mn + 8,4Si + 2,4Cr + 1,6Ni + 4Cu + 0,5W + 1,4Mo + 15,4Ti) + 18Al, \quad (6.4)$$

для предела текучести шва, кгс/мм²

$$\sigma_{тш} = 0,73 \sigma_{вш}, \quad (6.5)$$

для относительного поперечного сужения, %

$$\psi_{ш} = 2,32 \delta_{ш}. \quad (6.6)$$

В этих формулах значение каждого компонента принято в процентах.

Формулы (6.2 - 6.6) справедливы при условии, что концентрация отдельных элементов лежит в указанных выше пределах, суммарное содержание всех легирующих элементов не превышает 5% и скорость охлаждения металла шва не превышает $2^\circ\text{C}/\text{с}$ (т.е. отсутствует эффект закалки).

При больших скоростях охлаждения необходимо учитывать эффект закалки, используя данные рис. 6.2, из которого эффект закалки в

зависимости от скорости охлаждения приведен для двух эквивалентных содержаний углерода $C_3 = 0,26$ и $C_3 = 0,57$. Для промежуточных значений C_3 рекомендуется пользоваться интерполяцией. С целью определения коэффициентов (рис. 6.2) рассчитывают скорость охлаждения на принятом режиме.

Эквивалентное содержание углерода в шве подсчитывают по формуле:

$$C_3 = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{V}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{15} + \frac{P}{2}, \quad (6.7)$$

где C, Mn, Cr, V, Mo и т.д. — содержание в процентах легирующих элементов в металле шва. Медь и фосфор учитывают только в том случае; если концентрация меди больше 0,5%, а фосфора больше 0,05%.

Содержание рассматриваемого элемента в металле шва определяется на основании правила смешения по формуле:

$$|x|_ш = \gamma_0 |x|_{ом} + (1 - \gamma_0) |x|_э \pm \Delta X, \quad (6.8)$$

где $|x|_ш, |x|_{ом}, |x|_э$ — концентрация рассматриваемого элемента в металле шва, основном и электродном металле;

ΔX — обобщенное изменение данного элемента в составе основного и электродного металлов вследствие взаимодействия расплавленного металла с окружающей средой;

γ_0 — доля участия основного металла в формировании шва, определяется по формуле:

$$\gamma_0 = \frac{F_{пр}}{F_{пр} + F_{н}}, \quad (6.9)$$

где $F_{н}$ — площадь расплавленного металла, определяется по формулам (1.3 - 1.6), (2.25)

$F_{пр}$ — площадь провара, определяется по формуле

$$F_{пр} = \eta_{пр} \frac{I_{св} \cdot U_{св}}{U_{св}} \cdot 0,95 \cdot 10^{-4}, \quad (6.10)$$

Коэффициенты, учитывающие влияние скорости охлаждения металла шва на его механические свойства

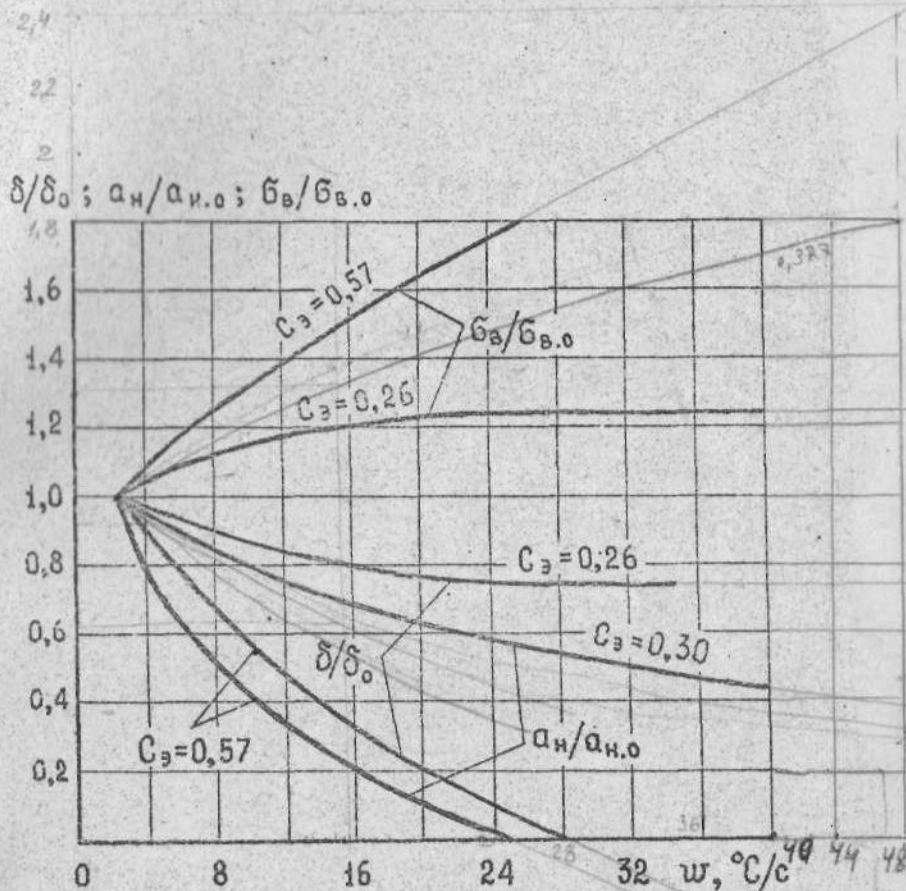
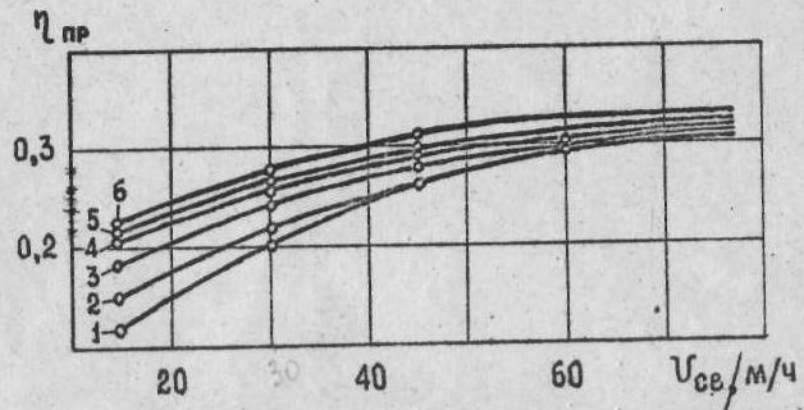


Рис. 6.2

Зависимость полного теплового к.п.д. от скорости сварки и плотности тока в электроде (механизированная сварка под флюсом)



1 - 25 А/мм²; 2 - 30 А/мм²; 3 - 40 А/мм²;
4 - 80 А/мм²; 5 - 160 А/мм²; 6 - 250 А/мм²

Рис. 6.3

где $\eta_{пр}$ - полный тепловой к.п.д., определяется в зависимости от скорости сварки и плотности тока в электроде (рис. 6.3).