

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра «Технологии сварочного производства и диагностики»

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКИ
(НАПЛАВКИ)**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к проведению практических занятий по дисциплине
«Методы повышения износостойкости деталей машин»
для студентов направления подготовки 15.04.01 «Машиностроение»
программа «Технологии сварочного производства»
очной и заочной форм обучения

Воронеж 2021

УДК 621.791
ББК 34.641

Составители:

канд. техн. наук И. Б. Корчагин,
д-р техн. наук В.В. Пешков

Расчет параметров режима электродуговой сварки (наплавки): методические указания к проведению практических занятий по дисциплине «Методы повышения износостойкости деталей машин» для студентов направления подготовки 15.04.01 «Машиностроение» программа «Технологии сварочного производства» очной и заочной форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: И. Б. Корчагин, В.В. Пешков. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. 21 с.

В методических указаниях изложены методики расчета параметров режима электродуговой сварки. Предназначены студентам, обучающимся по направлению 15.04.01 «Машиностроение» программа «Технологии сварочного производства» для проведения практических занятий по дисциплине «Методы повышения износостойкости деталей машин».

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле МУ_МПИДМ.pdf.

Табл. 17.

УДК 621.791
ББК 34.641

Рецензент - В. Ф. Селиванов, д-р техн. наук, зав. кафедрой «ТСПД»

Издается по решению учебно-методического совета Воронежского государственного технического университета

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях сварочного производства металлоконструкций широко применяют различные методы и способы сварки, тем не менее, наиболее часто используемой в практике является электродуговая сварка, которая может быть реализована в виде:

- ручной дуговой сварки покрытыми электродами;
- полуавтоматической и автоматической сварки под слоем флюса;
- ручной, полуавтоматической, автоматической и роботизированной сварки в среде защитного газа (газов);
- полуавтоматической, автоматической и роботизированной сварки самозащитной проволокой.

Ясность процесса образования сварного соединения, способность сваривать многие металлы и сплавы в самом широком диапазоне толщин, универсальность процесса, широкие возможности для механизации, автоматизации и роботизации сварочной технологии делают электродуговую сварку наиболее массовым способом сварки в различных отраслях промышленности.

Следует отметить, что производительность процесса сварки во много зависит от параметров режима, поэтому расчет параметров режима сварки, позволяющий обоснованно предложить определенную технологию, уточнить степень механизации, автоматизации или роботизации процесса сварки, является актуальной задачей.

1. РУЧНАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

При ручной дуговой сварке покрытыми электродами к параметрам режима сварки относятся диаметр электрода, сила сварочного тока, напряжение на дуге, скорость перемещения электрода вдоль шва (скорость сварки), род тока, полярность и др. Из перечисленных параметров в операционных и технологических картах указываются только диаметр электрода и сила сварочного тока.

Диаметр электрода, мм, выбирают в зависимости от толщины свариваемого металла, типа сварного соединения и положения шва в пространстве. При выборе диаметра электрода можно использовать ориентировочные данные, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Зависимость диаметра электрода от толщины металла

Толщина листа, мм	1 – 2	3	4 – 5	6 – 10	10 – 15	Более 15
Диаметр электрода, мм	1,6 – 2,0	2,0 – 3,0	3,0 – 4,0	4,0 – 5,0	5,0	Более 5,0

В многослойных стыковых швах корневой шов выполняют электродом диаметром 3 – 4 мм, заполняющие слои – электродами большего диаметра.

Сварку в вертикальном положении проводят с применением электродов диаметром не более 5 мм.

Потолочные швы выполняют электродами диаметром до 4 мм.

Сила сварочного тока, A , рассчитывается по формуле

$$I_{CB} = k \cdot d_{эл},$$

где k – коэффициент, равный 25 – 60 А/мм; $d_{эл}$ – диаметр электрода, мм.

Зависимость между коэффициентом k и диаметром электрода приведена в таблице 2.

Таблица 2

Зависимость коэффициента k от диаметра электрода

Диаметр электрода $d_{эл}$, мм	1 - 2	3 - 4	5 - 6
Коэффициент k , А/мм	25 - 30	30 - 45	45 - 60

Силу сварочного тока, рассчитанную по вышеприведенной формуле, следует откорректировать с учетом толщины свариваемых элементов, типа сварного соединения и положения шва в пространстве. При толщине металла более трех диаметров электрода, силу сварочного тока увеличивают на 10 – 15%; если толщина металла меньше чем полутора диаметра электрода, силу сварочного тока уменьшают на 10 – 15%. При сварке угловых швов значение сварочного тока увеличивают на 10 – 15%. При сварке швов в вертикальном и потолочном положениях силу сварочного тока уменьшают на 10 – 15%.

Уточнить значение величины сварочного тока можно также по формуле:

$$I_{CB} = (20 + 6d_{эл}) \cdot d_{эл}.$$

Напряжение на дуге, V , при ручной дуговой сварке зависит от многих факторов: типа и толщины покрытия, состава и диаметра стержня электрода, положения шва и длины дуги.

Оценить значение напряжения на дуге для электродов, например с покрытием основного типа, можно по выражению:

$$U_{д} = 12 + 0,36 \frac{I_{CB}}{d_{эл}},$$

а для электродов с покрытием рутилового типа –

$$U_{д} = 12 + 1,7 \frac{I_{CB}}{d_{эл}}.$$

Обычно значение напряжения на дуге находится в пределах 20 - 36 В. Для большинства марок электродов используемых при сварке углеродистых и легированных конструкционных сталей величина напряжения на дуге составляет 22 - 28 В.

Скорость сварки, м/ч, т. е. перемещение дуги, может быть определена по зависимости

$$V_{CB} = \frac{\alpha_n \cdot I_{CB}}{\gamma \cdot F_n \cdot 100},$$

где α_n - коэффициент наплавки, г/(А·ч); γ - плотность наплавленного металла, г/см³; F_n - площадь поперечного сечения наплавленного металла за данный проход, см².

Коэффициент наплавки (табл. 3) принимают из характеристик выбранного электрода.

Таблица 3

Коэффициенты наплавки и расхода некоторых электродов

Тип электрода	Марка электрода	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Коэффициент расхода электродов $K_{эл}$
Э42А	УОНИ 13/45	9,5	1,65
Э42А	СМ-11	10,0	1,7
Э46	МР-3	8,5	1,7
Э46	ОЗС-4	9,0	1,65
Э46	АНО-3	9,0	1,65
Э50А	УОНИ 13/55	9,0	1,65
Э50А	ВСФС-50	8,0	1,6
Э55	ВСФ-60	8,0	1,6
Э70	ВСФ-75	8,0	1,6

С достаточной для инженерных расчетов точностью плотность наплавленного металла (плотность стали) может быть принята равной $7,85 \text{ г/см}^3$.

Площадь поперечного сечения наплавленного металла зависит от типа соединения, толщин свариваемых элементов (катета сварного шва) и может быть определена по таблице 4.

Отметим, что при многопроходной сварке корневой шов, выполняемый электродами диаметром 3 – 4 мм, будет иметь площадь поперечного сечения

$$F_k = (5 \dots 7) \cdot d_{эл.}$$

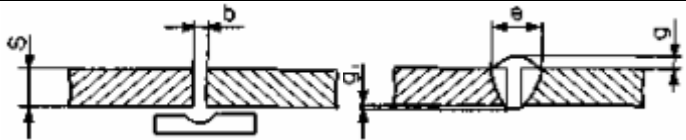

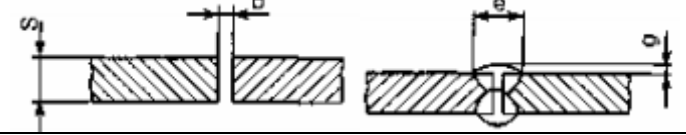
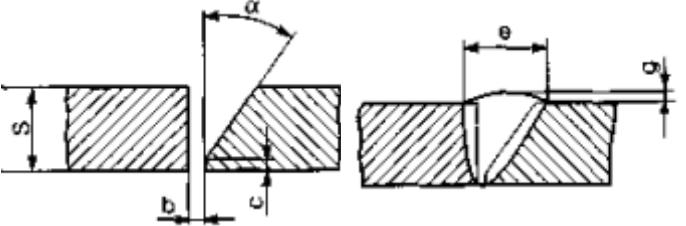
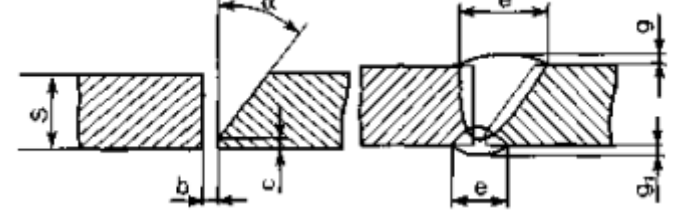
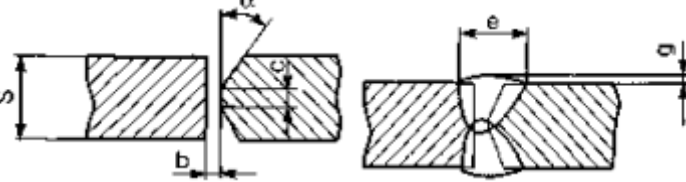
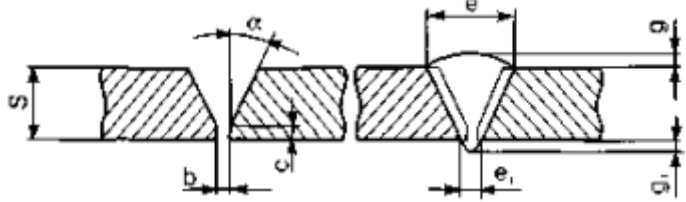
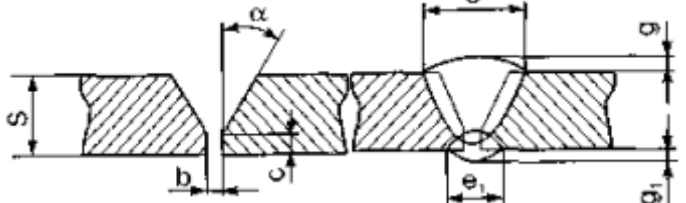
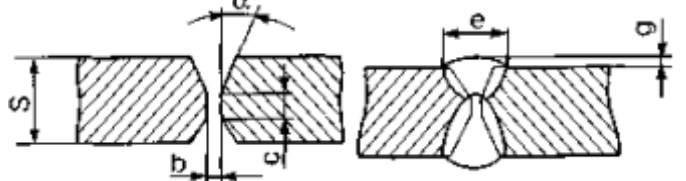
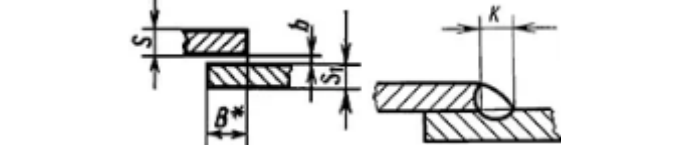
Площадь поперечного сечения заполняющих швов может быть определена как

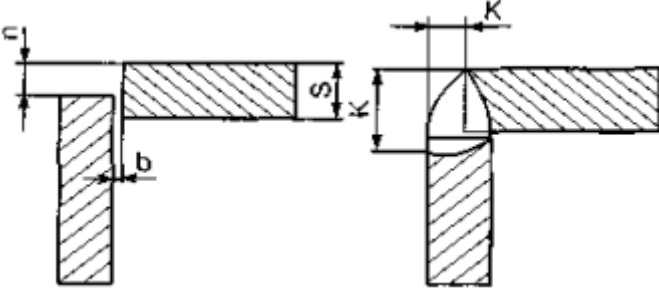
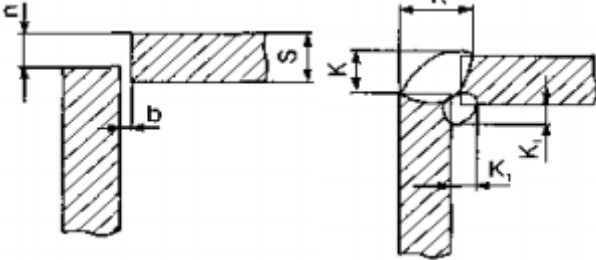
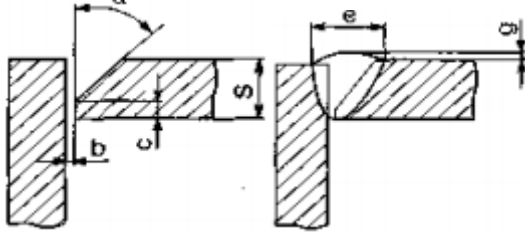
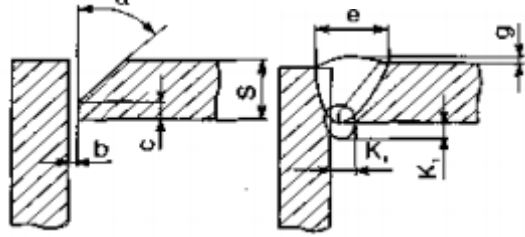
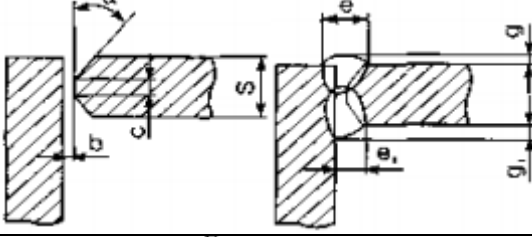
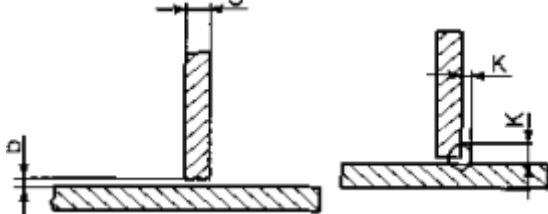
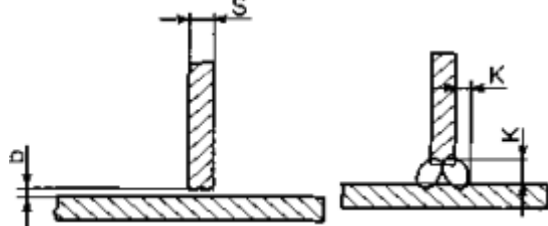
$$F_3 = F_H - F_k.$$

Таблица 4

Формулы для расчета площади поперечного сечения некоторых сварных швов

Условное обозначение сварного соединения	Конструктивные элементы подготовленных кромок свариваемых деталей и сварного шва	Формула
С1		$F_H = Sb + 0,75eg$
С2		$F_H = Sb + 0,75(eg + e_1g_1)$

C4		$F_H = Sb + 0,75(eg + e_1g_1)$
C5		$F_H = Sb + 0,75eg$
C7		$F_H = Sb + 1,5eg$
C8		$F_H = Sb + 0,5(S - c)^2 \operatorname{tg} \alpha + 0,75eg$
C12		$F_H = Sb + 0,5(S - c)^2 \operatorname{tg} \alpha + 0,75(eg + e_1g_1)$
C15		$F_H = Sb + 0,25(S - c)^2 \operatorname{tg} \alpha + 1,5eg$
C17		$F_H = Sb + (S - c)^2 \operatorname{tg} \alpha + 0,75(eg + e_1g_1)$
C21		$F_H = Sb + (S - c)^2 \operatorname{tg} \alpha + 0,75(eg + e_1g_1)$
C25		$F_H = Sb + 0,5(S - c)^2 \operatorname{tg} \alpha + 1,5eg$
H1		$F_H = 0,5k^2 + 1,05k$

Y4		$F_H = Sb + 0,5n^2 + 1,05k$
Y5		$F_H = Sb + 0,5n^2 + 1,05n + 0,5k_1^2 + 1,05k_1$
Y6		$F_H = Sb + 0,5(S - c)^2 \operatorname{tg} \alpha + 0,75eg$
Y7		$F_H = Sb + 0,5(S - c)^2 \operatorname{tg} \alpha + 0,75eg + 0,5k_1^2 + 1,05k_1$
Y8		$F_H = Sb + 0,25(S - c)^2 \operatorname{tg} \alpha + 0,75(eg + e_1g_1)$
T1		$F_H = 0,5k^2 + 1,05k$
T3		$F_H = k^2 + 2,1k$

Т6		$F_H = Sb + 0,5(S - c)^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha + 0,75eg$
Т7		$F_H = Sb + 0,5(S - c)^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha + 0,75eg + 0,5k_1^2 + 1,05k_1$
Т8		$F_H = Sb + 0,25(S - c)^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha + 1,5eg$

Длина дуги, мм, влияет на качество сварки. Короткая дуга, равная $(0,5 - 1,1)d_{эл}$, горит устойчиво и спокойно. Она обеспечивает получение высококачественного шва, расплавленный металл электрода быстро проходит дуговой промежуток и меньше подвергается окислению и азотированию. Но слишком короткая дуга вызывает «залипание» электрода, дуга прерывается, нарушается процесс сварки. Длинная дуга горит неустойчиво, с характерным «шипением», глубина проплавления недостаточная, расплавленный металл электрода разбрызгивается. Для электродов с толстым покрытием длину дуги указывают на заводской этикетке.

Масса наплавленного металла, г, для ручной дуговой сварки рассчитывается по формуле

$$G_H = F_H \cdot L \cdot \gamma,$$

где L – длина шва, см.

Расход электродов, г, для ручной дуговой сварки определяют по формуле

$$G_{эл} = G_H \cdot k_{эл}$$

где $k_{эл}$ – коэффициент, учитывающий расход электродов на 1 кг наплавленного металла (табл. 3).

Время горения дуги, ч, определяется как

$$t_0 = \frac{G_H}{\alpha_H \cdot I_{св}}$$

Полное время сварки, ч, приближенно можно оценить по формуле

$$T = \frac{t_0}{k_n},$$

где k_n – коэффициент использования сварочного поста, который может быть принят равным 0,50 – 0,55.

Расход электроэнергии, кВт·ч, определяют по формуле

$$A = \frac{U_d \cdot I_{св}}{\eta \cdot 1000} t_0 + W_0(T - t_0),$$

где η - КПД источника питания сварочной дуги (для источников питания постоянного тока может быть принят равным 0,70 - 0,75; для источников питания переменного тока – 0,85 – 0,90); W_0 – энергия, расходуемая источником питания на холостом ходе (для источников питания постоянного тока может быть принята равной 0,2 - 0,4 кВт; для источников питания переменного тока можно принять равной нулю).

2. ДУГОВАЯ СВАРКА НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В СРЕДЕ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ

Дуговая сварка неплавящимся электродом в среде инертных газов может выполняться в ручном, механизированном и автоматизированном режимах. При этом сварка может выполняться без присадочных материалов и с присадочными материалами.

Отметим, что односторонняя сварка неплавящимся электродом встык без разделки кромок, без гарантированного зазора, без присадки может быть выполнена с полным проваром при толщине металла не более 5 мм, в тоже время применение присадочной проволоки позволяет получать соединения при толщине металла более 1,5 мм.

При дуговой сварке неплавящимся электродом к параметрам режима сварки относятся род и полярность тока, диаметр электрода, сила сварочного тока, напряжение на дуге, скорость сварки, вылет электрода, расход защитного газа.

Род и полярность тока. Большинство сталей и металлов сваривают на постоянном токе прямой полярности. На переменном токе сваривают алюминий, магний и бериллий.

Диаметр вольфрамового электрода, мм, выбирают в зависимости от толщины и вида свариваемого материала (табл. 5).

Таблица 5

Зависимость диаметра вольфрамового электрода

Цветные металлы					
Толщина металла, мм	1	2	4	5 - 6	7 и более
Диаметр электрода, мм	1,5	2	3	4	5
Углеродистые конструкционные и нержавеющей стали, жаропрочные сплавы					
Толщина металла, мм	0,5	1	2	3	4
Диаметр электрода, мм	1	1,5	2	3	4
					5 и более
					6

Сила сварочного тока, A , определяется диаметром вольфрамового электрода (табл. 6) его маркой и материалом свариваемого изделия, также следует учитывать род и полярность тока.

Таблица 6

Зависимость силы сварочного тока от диаметра вольфрамового электрода

Диаметр электрода, мм	Род и полярность тока		
	Переменный ток	Постоянный ток прямой полярности	Постоянный ток об- ратной полярности
1 - 2	20 – 100	65 – 160	10 – 30
3	100 – 160	140 – 180	20 – 40
4	140 – 220	250 – 340	30 – 50
5	200 – 280	300 – 400	40 – 80
6	250 – 300	350 – 450	60 - 100

Зависимость между максимально допустимым сварочным током и диаметром электрода при сварке на постоянном токе прямой полярности выражается формулой:

$$I_{св} = 65 \cdot \sqrt{d_{эл}^3}$$

Наилучшими сварочными характеристиками обладают иттрированные электроды ЭВИ-3, они дают возможность работать на относительно больших плотностях тока (до 50 А/мм²) при меньшем расходе вольфрама.

Напряжение на дуге, V , зависит от ее длины. Рекомендуется вести сварку на минимально короткой дуге, что соответствует пониженному напряжению на ней. При повышении напряжения увеличивается ширина шва, уменьшается глубина проплавления и ухудшается защита зоны сварки. Оптимальная длина дуги составляет 1,5 – 3 мм, что соответствует напряжению 11 – 14 В.

Скорость сварки, м/ч, определяют опытным путем в зависимости от размеров и формы получаемого шва.

В случае определенности коэффициента наплавки и силы сварочного тока, может быть использована зависимость

$$V_{св} = \frac{\alpha_n \cdot I_{св}}{\gamma \cdot F_n \cdot 100},$$

где α_n - коэффициент наплавки, г/(А·ч); γ - плотность наплавленного металла, г/см³; F_n - площадь поперечного сечения наплавленного металла за данный проход, см² (табл. 4).

Следует отметить, что отсутствует возможность теоретически оценить величину коэффициента наплавки вследствие влияния техники ведения сварочных работ и других факторов на данную величину. Из справочных данных известно, что производительность процесса аргонодуговой сварки лежит в пределах 1,0 – 1,7 кг/ч, при соответствующей величине сварочного тока 100 – 400 А. Соотнеся эти показатели можно сказать, что величина коэффициента наплавки

может колебаться в пределах 4,2 – 10 г/А·ч, и должна уточняться в каждом конкретном случае сварочной технологии.

В ряде случаев для сварки неплавящимся электродом сталей рекомендуется использовать защитные газовые смеси, состав и назначение которых приведены в таблице 7.

Таблица 7

Состав и назначение защитных газовых смесей

Состав смеси	Цель применения	Область применения
75% Ar + 25% He	Улучшение формирования шва и увеличение проплавляющей способности дуги	Сплавы всех марок
99% Ar + до 1% O ₂	Повышение стабильности горения дуги на переменном токе	Конструкционные стали
90% Ar + 10% H ₂	Увеличение проплавляющей способности дуги и уменьшение выгорания легирующих элементов	Нержавеющие и жаропрочные стали и сплавы

Вылет электрода, мм, при сварке стыковых соединений должен составлять 3 – 5 мм, при сварке тавровых, угловых, нахлесточных соединений – 5 – 8 мм.

Масса наплавленного металла, г, для аргонодуговой сварки рассчитывается по формуле

$$G_H = F_H \cdot L \cdot \gamma,$$

где L – длина шва, см.

Расход присадочной проволоки, г, если она используется для аргонодуговой сварки, определяют по формуле

$$G_{\text{пр.п.}} = G_H \cdot k_{\text{пр.п.}}$$

где $k_{\text{пр.п.}}$ – коэффициент, учитывающий потери на разбрызгивание и угар присадочной проволоки при ведении сварочных работ, может быть принят равным 1,01 – 1,02.

Расход защитного газа, л/мин выбирают таким образом, чтобы сохранить ламинарный поток струи газа. Расход защитного газа зависит от вида материала, толщины соединяемых элементов, характера их сопряжения, величины сварочного тока и может колебаться в определенных пределах (табл. 8).

Таблица 8

Зависимость расхода защитного газа для стыкового соединения

Материал	Толщина металла, мм	Сила тока, А	Расход газа, л/мин
Стали	0,8 - 2	70 - 110	8 - 10
	4	120	10 - 12
	6	140	10 - 12
Алюминий и его сплавы	2	70 - 80	5 - 6
	4	160 - 210	7 - 8
	6	260 - 300	10 - 12
Медь и ее сплавы	1,2 – 1,5	120 - 150	7 - 9
	2,5	190 - 230	8 - 10
	3	230 - 240	9 - 12

Время горения дуги, t_0 , определяется как

$$t_0 = \frac{G_H}{\alpha_H \cdot I_{CB}}$$

Полное время сварки, T , приближенно можно оценить по формуле

$$T = \frac{t_0}{k_{\Pi}}$$

где k_{Π} – коэффициент использования сварочного поста, который может быть принят равным 0,50 – 0,55.

Расход электроэнергии, $кВт \cdot ч$, определяют по формуле

$$A = \frac{U_D \cdot I_{CB}}{\eta \cdot 1000} t_0 + W_0(T - t_0),$$

где η - КПД источника питания сварочной дуги (для источников питания постоянного тока может быть принят равным 0,70 - 0,75; для источников питания переменного тока – 0,85 – 0,90); W_0 – энергия, расходуемая источником питания на холостом ходе (для источников питания постоянного тока может быть принята равной 0,2 - 0,4 кВт; для источников питания переменного тока можно принять равной нулю).

3. ДУГОВАЯ СВАРКА ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В СРЕДЕ ЗАЩИТНОГО ГАЗА

При сварке плавящимся электродом в среде защитного газа к параметрам режима сварки относятся род и полярность тока, диаметр электродной проволоки, сила сварочного тока, напряжение на дуге, скорость сварки, вылет электрода.

Род и полярность тока. Сварку обычно выполняют на постоянном токе обратной полярности. При прямой полярности скорость расплавления в 1,4 – 1,6 раза выше чем при обратной, однако дуга горит менее стабильно, с интенсивным разбрызгиванием.

Диаметр электродной проволоки, мм, выбирают в зависимости от толщины свариваемого материала и положения шва в пространстве. Обычно, диаметр электродной проволоки лежит в пределах 0,5 – 2,5 мм (табл. 9). Чем меньше диаметр электродной проволоки, тем устойчивее горение дуги, больше глубина проплавления и коэффициент наплавки, меньше разбрызгивание. Большой диаметр проволоки требует увеличения сварочного тока.

Таблица 9

Зависимость диаметра электродной проволоки от толщины металла

Толщина листа, мм	0,5 - 1	1 - 2	2 - 4	5 - 8	8 - 12	12 - 18
Диаметр электродной проволоки, мм	0,5 - 0,8	0,8 - 1,0	1,0 - 1,2	1,4 - 2,0	2,0	2,0 - 2,5

Сила сварочного тока, A , рассчитывается по формуле

$$I_{\text{св}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{эл}}^2}{4} \cdot j,$$

где j – плотность тока в электродной проволоке, А/мм².

Величина плотности тока в электродной проволоке для обычного режима сварки может колебаться в пределах от 50 до 250 А/мм². При форсированном режиме, величина плотности тока может достигать 250 – 450 А/мм². Возможность применения высокой плотности тока связана с малой длиной вылета электрода (8 – 15 мм) при сварке в среде защитного газа. Длина дуги составляет 1,5 - 4 мм.

С увеличением плотности тока будет возрастать глубина проплавления, при этом количество наплавленного металла возрастает медленнее, чем проплавление и доля электродного металла в металле шва существенно уменьшается.

Рекомендуемые плотности тока для заданных диаметров электродной проволоки приведены в таблице 10.

Таблица 10

Зависимость плотности тока от диаметра электродной проволоки

Диаметр электродной проволоки, мм	0,5	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	2,0
Плотность тока, А/мм ²	150 - 250	120 - 240	100 - 200	100 - 200	100 - 190	90 - 180	70 - 150

Напряжение на дуге, В и расход защитного газа, л/мин, при дуговой сварке в среде защитного газа выбирают в зависимости от силы сварочного тока. Зависимость параметров режима сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей от силы сварочного тока приведена в таблице 11.

Таблица 11

Зависимость параметров режима сварки от силы сварочного тока

Сила сварочного тока, А	50 - 90	80 - 120	100 - 180	160 - 220	200 - 280	250 - 320	300 - 450
Напряжение на дуге, В	17 – 18	18 – 20	19 – 22	21 – 26	25 – 28	27 – 30	30 – 36
Расход защитного газа, л/мин	6 - 7	7 - 9	8 - 10	10 - 12	12 - 15	14 - 16	15 - 20

В качестве защитной среды для данного способа сварки, наибольшее применение в современном сварочном производстве нашли смеси аргона и углекислого газа в различных пропорциях. Такие смеси имеют определенные преимущества перед активными газами и их смесями и перед инертными газами. Характеристики смесей и рекомендации по их применению приведены в таблице 12.

Газовые смеси аргона и углекислого газа и рекомендации по их применению

Смесь	Применение
98% Ar + 2% CO ₂	Применяется для сварки изделий из хромоникелевых сталей, изделий из конструкционных сталей малой толщины (до 1 мм), а также сварки-пайки оцинкованных изделий
90% Ar + 10% CO ₂	Применяется для сварки изделий из низко- и среднелегированных сталей, сварки на повышенных скоростях, импульсной сварки
82% Ar + 18% CO ₂	Применяется для сварки изделий из конструкционных сталей, наплавке высокопрочных сталей
80% Ar + 20% CO ₂	Применяется для сварки и наплавки изделий из конструкционных сталей, сварки хромоникелевых сталей порошковой проволокой
75% Ar + 25% CO ₂	Применяется для сварки и наплавки изделий из конструкционных сталей, сварки трубопроводов, сварки швов в любых пространственных положениях. Смесь отличается высокой проплавливающей способностью при минимальном разбрызгивании металла

Скорость подачи электродной проволоки, м/ч, рассчитывают по формуле

$$V_{\text{эл.п.}} = \frac{4 \cdot \alpha_p \cdot I_{\text{св}}}{\pi \cdot d_{\text{эл}}^2 \cdot \gamma},$$

где α_p - коэффициент расплавления проволоки, г/(А·ч); γ - плотность металла, г/см³.

Величина коэффициента расплавления проволоки может быть определена по формуле

$$\alpha_p = 3,0 + 0,08 \frac{I_{\text{св}}}{d_{\text{эл}}}.$$

Скорость сварки, м/ч, определяют по формуле

$$V_{\text{св}} = \frac{\alpha_n \cdot I_{\text{св}}}{\gamma \cdot F_n \cdot 100},$$

где α_n - коэффициент наплавки, г/(А·ч), может быть определен как

$$\alpha_n = \alpha_p \cdot (1 - \psi),$$

где ψ - коэффициент потерь металла на угар и разбрызгивание; для рекомендуемых смесей (табл. 11), может быть принят равным – 0,05 – 0,08.

Масса наплавленного металла, г, рассчитывается по формуле

$$G_n = F_n \cdot L \cdot \gamma,$$

где L – длина шва, см; F_n - площадь поперечного сечения наплавленного металла за данный проход, см² (табл. 4).

Расход электродной проволоки, г, определяют по формуле

$$G_{\text{эл.п.}} = G_n \cdot (1 + \psi).$$

Время горения дуги, ч, определяется как

$$t_0 = \frac{G_n}{\alpha_n \cdot I_{\text{св}}}.$$

Полное время сварки, ч, приближенно можно оценить по формуле

$$T = \frac{t_0}{k_n},$$

где k_n – коэффициент использования сварочного поста, который может быть принят равным 0,57 – 0,6.

Расход электроэнергии, кВт·ч, определяют по формуле

$$A = \frac{U_d \cdot I_{св}}{\eta \cdot 1000} t_0 + W_0(T - t_0),$$

где η - КПД источника питания сварочной дуги (для источников питания постоянного тока может быть принят равным 0,70 - 0,75; для источников питания переменного тока – 0,85 – 0,90); W_0 – энергия, расходуемая источником питания на холостом ходе (для источников питания постоянного тока может быть принята равной 0,2 - 0,4 кВт; для источников питания переменного тока можно принять равной нулю).

4. ДУГОВАЯ СВАРКА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ

При дуговой сварке порошковой проволокой к параметрам режима сварки относятся род и полярность тока, диаметр электродной проволоки, сила сварочного тока, напряжение на дуге, скорость сварки, вылет электрода.

Следует отметить, что порошковые проволоки применяются для сварки без защиты и с дополнительной защитой зоны дуги газом или флюсом. Проволоки, не требующие дополнительной защиты, называются самозащитными.

Род и полярность тока. Дуговую сварку порошковой проволокой обычно выполняют на постоянном токе обратной полярности.

Диаметр электродных проволок, мм, разработанных в ИЭС им. Е.О. Патона лежит в пределах 1,2 – 4,5 мм. Большинство марок порошковых проволок имеют один, два иногда три варианта диаметра. Выбирают диаметр электродной проволоки, определившись с ее назначением, в зависимости от толщины свариваемого материала и положения шва в пространстве.

Сила сварочного тока, А, и другие параметры режима сварки определяются по рекомендации организации - разработчика порошковой проволоки – ИЭС им. Е.О. Патона (табл. 13).

Таблица 13

Параметры режима сварки некоторыми порошковыми проволоками

Марка порошковой проволоки	Диаметр, мм	Сила сварочного тока, А	Напряжение на дуге, В	Вылет электрода, мм
ПП-1ДСК	2,4	180 - 320	24 - 32	15 - 40
ПП-АН1	2,8	220 - 320	26 - 31	15 - 40
ПП-АН3	2,8	250 - 450	22 - 29	20 - 50
	3,0	350 - 500	24 - 31	30 - 60
ПП-АН7	2,0	150 - 300	20 - 26	15 - 40
	2,3	250 - 340	23 - 28	20 - 50
ПП-АН11	2,0	140 - 280	20 - 26	15 - 45
	2,4	240 - 340	23 - 30	20 - 50

Величина плотности тока в порошковой электродной проволоке может колебаться в пределах от 25 до 160 А/мм².

Скорость подачи электродной проволоки, м/ч, рассчитывают по формуле

$$V_{\text{эл.п.}} = \frac{4 \cdot \alpha_p \cdot I_{\text{св}}}{\pi \cdot d_{\text{эл}}^2 \cdot \gamma},$$

где α_p - коэффициент расплавления проволоки, г/(А·ч); γ - плотность металла, г/см³.

Величина коэффициента расплавления проволоки может быть определена по формуле

$$\alpha_p = \alpha_n \cdot k_{\text{эл.п}}$$

где $k_{\text{эл.п.}}$ - коэффициент расхода порошковой проволоки (табл. 14), учитывающий ряд обстоятельств:

- порошковая проволока имеет частично неметаллический наполнитель, известно, что коэффициент заполнения порошковой проволоки лежит в пределах 10 – 40 %, поэтому действительная ее плотность оказывается на 10 – 15% меньше по сравнению с проволокой сплошного сечения;
- потери на разбрызгивание металла порошковой проволоки составляют 2 – 7 % в зависимости от марки проволоки и режима сварки;
- угар металла в процессе сварки.

Таблица 14

Технологические параметры некоторых порошковых проволок

Марка порошковой проволоки	Коэффициент наплавки, г/А·ч	Коэффициент расхода порошковой проволоки
ПП-1ДСК	15,6 - 16,7	1,3 - 1,35
ПП-АН1	13,6 - 15,6	1,3 - 1,35
ПП-АН3	14,3 - 20,0	1,27 - 1,3
ПП-АН7	20,6 - 26,6	1,25 - 1,3
ПП-АН11	20,6 - 21,4	1,25 - 1,3

Скорость сварки, м/ч, определяют по формуле

$$V_{\text{св}} = \frac{\alpha_n \cdot I_{\text{св}}}{\gamma \cdot F_n \cdot 100},$$

где α_n - коэффициент наплавки, г/(А·ч) (табл. 13).

Масса наплавленного металла, г, рассчитывается по формуле

$$G_n = F_n \cdot L \cdot \gamma,$$

где L - длина шва, см; F_n - площадь поперечного сечения наплавленного металла за данный проход, см² (табл. 4).

Расход электродной проволоки, г, определяют по формуле

$$G_{\text{эл.п.}} = G_n \cdot k_{\text{эл.п.}}$$

Время горения дуги, ч, определяется как

$$t_0 = \frac{G_n}{\alpha_n \cdot I_{\text{св}}}.$$

Полное время сварки, ч, приближенно можно оценить по формуле

$$T = \frac{t_0}{k_{\Pi}},$$

где k_{Π} – коэффициент использования сварочного поста, который может быть принят равным 0,57 – 0,6.

Расход электроэнергии, кВт·ч, определяют по формуле

$$A = \frac{U_{\text{д}} \cdot I_{\text{св}}}{\eta \cdot 1000} t_0 + W_0 (T - t_0),$$

где η - КПД источника питания сварочной дуги (для источников питания постоянного тока может быть принят равным 0,70 - 0,75; для источников питания переменного тока – 0,85 – 0,90); W_0 – энергия, расходуемая источником питания на холостом ходе (для источников питания постоянного тока может быть принята равной 0,2 - 0,4 кВт; для источников питания переменного тока можно принять равной нулю).

5. ДУГОВАЯ СВАРКА ПОД СЛОЕМ ФЛЮСА

При дуговой сварке под слоем флюса к параметрам режима сварки относятся род и полярность тока, диаметр электродной проволоки, сила сварочного тока, напряжение на дуге, скорость сварки, скорость подачи электродной проволоки.

Род и полярность тока влияют на форму и размеры шва. При сварке на постоянном токе обратной полярности глубина провара примерно на 40 % больше, чем при сварке на прямой полярности. При сварке на переменном токе глубина провара на 15 - 20 % ниже, чем при сварке на постоянном токе обратной полярности. Это объясняется формой столба дуги. Анодное пятно занимает большую площадь по сравнению с катодным, поэтому ширина ванны на прямой полярности возрастает.

Род и полярность тока заметно влияют на скорость плавления электродной проволоки. При сварке на одинаковых токах скорость плавления на обратной полярности ниже на 20 - 30 %, чем на прямой, поэтому при сварке на постоянном токе стыковых соединений без скоса кромок и угловых соединений с малым катетом, следует применять ток обратной полярности. При работах, связанных с необходимостью наплавления большого количества металла, целесообразно использовать ток прямой полярности. Для сварки на токах свыше 300 – 400 А по экономическим соображениям следует применять переменный ток.

Диаметр электродной проволоки, мм, лежит в пределах 0,8 – 6 мм, причем для полуавтоматического процесса используются проволоки диаметром 0,8 – 2 мм, а для автоматического – 1 – 6 мм. Диаметр электродной проволоки оказывает большое влияние на размер и форму сварного шва. Уменьшение диаметра проволоки при заданной величине сварочного тока приводит к уменьшению подвижности столба дуги и, как следствие, к увеличению глубины провара и уменьшению ширины шва. Особенно это влияние при сварке на небольших токах.

Таким образом, заданная глубина провара может быть достигнута при меньшем токе снижением диаметра электрода. Однако использование этого явления не всегда возможно, так как применение электрода малого диаметра приводит к ухудшению формирования шва за счет уменьшения ширины провара и затруднения точного направления электрода по шву из-за малой его жесткости. Электродную проволоку малого диаметра при сварке на токах повышенной плотности следует применять для получения узкого шва с глубоким проплавлением, а электроды большего диаметра при сварке на токе пониженной плотности - для получения широкого шва с небольшим проплавлением основного металла (например, наплавочные работы).

Значение диаметра электродной проволоки должно учитывать возможные плотности сварочного тока, которые могут колебаться в пределах от 35 до 300 А/мм². Возможность применения высокой плотности тока связана с длиной вылета электрода, не превышающей 70 мм.

Сила сварочного тока, A , рассчитывается исходя из требуемой глубины проплавления основного металла по формуле

$$I_{св} = \frac{H_{пр}}{k_h} \cdot 100,$$

где $H_{пр}$ – требуемая глубина проплавления основного металла, мм; k_h - эмпирический коэффициент, зависящий от условий сварки, мм/А (табл. 15).

Таблица 15

Значения эмпирического коэффициента k_h

Марка флюса	Диаметр электродной проволоки, мм	коэффициент k_h , мм/А		
		Переменный ток	Постоянный ток	
			Прямая полярность	Обратная полярность
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-348А	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	-	-

Рекомендуемые значения плотности тока и силы тока для заданных диаметров электродной проволоки приведены в таблице 16.

Напряжение на дуге, B оказывает незначительное влияние на глубину провара, при этом ширина шва связана с напряжением на дуге прямой зависимостью. Ориентировочная зависимость силы сварочного тока и напряжения на дуге представлена в таблице 17.

Таблица 16

Зависимость плотности и силы тока от диаметра электродной проволоки

Диаметр электродной проволоки, мм	0,8	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
Плотность тока, А/мм ²	200 - 300	190 - 250	63 - 125	50 - 85	40 - 63	35 - 50	35 - 70
Сила тока, А	100 - 150	150 - 200	200 - 400	350 - 600	500 - 800	700 - 1000	1000 - 2000

Таблица 17

Зависимость силы сварочного тока и напряжения на дуге

Сила тока, А	100 - 150	150 - 200	200 - 400	350 - 600	500 - 800	700 - 1000	1000 - 2000
Напряжение на дуге, В	22 - 23	23 - 24	24 - 28	27 - 32	30 - 36	35 - 44	44 - 55

Уточнить величину напряжения на дуге можно используя формулу:

$$U_d = 20 + \frac{0,05}{\sqrt{d_{эл}}} \cdot I_{св}.$$

При слишком низком напряжении дуга горит нестабильно, поверхность шва получается не ровной, бугристой. С повышением напряжения формирование шва улучшается: он становится более широким и ровным с незначительным усилением. При чрезмерном увеличении напряжения дуги стабильность горения снижается, ширина провара может уменьшаться с ухудшением формирования шва. Для обеспечения правильного формирования шва с уменьшением диаметра электродной проволоки и увеличением плотности тока необходимо повышать напряжение дуги.

При сварке на постоянном токе требуется более низкое напряжение на обратной полярности, чем на прямой. Необходимость более низкого напряжения при обратной полярности тока объясняется меньшей подвижностью дуги.

Скорость подачи электродной проволоки, м/ч, рассчитывают по формуле

$$V_{эл.п.} = \frac{4 \cdot \alpha_p \cdot I_{св}}{\pi \cdot d_{эл}^2 \cdot \gamma},$$

где α_p - коэффициент расплавления проволоки, г/(А·ч); γ - плотность металла, г/см³.

Величина коэффициента расплавления проволоки может быть определена по формулам:

- для переменного тока

$$\alpha_p = 7,0 + 0,04 \frac{I_{св}}{d_{эл}};$$

- для постоянного тока прямой полярности

$$\alpha_p = 2,0 + \sqrt{\frac{I_{CB}}{d_{эл}}};$$

- для постоянного тока обратной полярности

$$\alpha_p = 10,0 - 12,0 \text{ г/А} \cdot \text{ч.}$$

Скорость сварки, м/ч, определяют по формуле

$$V_{CB} = \frac{\alpha_H \cdot I_{CB}}{\gamma \cdot F_H \cdot 100},$$

где α_H - коэффициент наплавки, г/(А·ч), определяемый как

$$\alpha_H = \alpha_p \cdot (1 - \psi),$$

где ψ - коэффициент потерь металла на угар и разбрызгивание может быть принят равным – 0,02 – 0,03.

Масса наплавленного металла, г, рассчитывается по формуле

$$G_H = F_H \cdot L \cdot \gamma,$$

где L – длина шва, см; F_H - площадь поперечного сечения наплавленного металла за данный проход, см² (табл. 4).

Расход электродной проволоки, г, определяют по формуле

$$G_{эл.п.} = G_H \cdot (1 + \psi).$$

Расход флюса, г/пог. м., определяют по формуле

$$G_{фл.} = \frac{(U_D - 1,8) \cdot 780}{V_{CB}}.$$

Время горения дуги, ч, определяется как

$$t_0 = \frac{G_H}{\alpha_H \cdot I_{CB}}.$$

Полное время сварки, ч, приближенно можно оценить по формуле

$$T = \frac{t_0}{k_n},$$

где k_n – коэффициент использования сварочного поста, который может быть принят равным 0,6 – 0,7.

Расход электроэнергии, кВт·ч, определяют по формуле

$$A = \frac{U_D \cdot I_{CB}}{\eta \cdot 1000} t_0 + W_0(T - t_0),$$

где η - КПД источника питания сварочной дуги (для источников питания постоянного тока может быть принят равным 0,70 - 0,75; для источников питания переменного тока – 0,85 – 0,90); W_0 – энергия, расходуемая источником питания на холостом ходе (для источников питания постоянного тока может быть принята равной 0,2 - 0,4 кВт; для источников питания переменного тока можно принять равной нулю).

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. РУЧНАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ ...	3
2. ДУГОВАЯ СВАРКА НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В СРЕДЕ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ.....	9
3. ДУГОВАЯ СВАРКА ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В СРЕДЕ ЗАЩИТНОГО ГАЗА	12
4. ДУГОВАЯ СВАРКА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ.....	15
5. ДУГОВАЯ СВАРКА ПОД СЛОЕМ ФЛЮСА.....	17

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКИ (НАПЛАВКИ)

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к проведению практических занятий по дисциплине
«Методы повышения износостойкости деталей машин»
для студентов направления подготовки 15.04.01 «Машиностроение»
программа «Технологии сварочного производства»
очной и заочной форм обучения

Составители:

Корчагин Илья Борисович,
Пешков Владимир Владимирович

Компьютерный набор И. Б. Корчагина

Подписано к изданию _____.
Объем данных _____.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14