

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Г. Н. Соколов, И. В. Зорин,  
А. А. Артемьев, Ю. Н. Дубцов

# ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СВАРКИ И НАПЛАВКИ

*учебно-методическое пособие*



Волгоград  
2016

УДК 621.791.72

## Р е ц е н з е н т ы

докт. техн. наук, профессор Волгоградского государственного педагогического университета А. М. Каунов;

директор ООО Промышленная компания «ХОБЭКС электрод»,  
канд. техн. наук, В. А. Пронин;

Издается по решению редакционно-издательского совета  
Волгоградского государственного технического университета

Технология и материалы для сварки и наплавки: учебно-метод. пособие / сост. Г. Н. Соколов, И. В. Зорин, А. А. Артемьев, Ю. Н. Дубцов / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – 96 с.

В учебно-методическом пособии приведены лабораторные работы, необходимые для изучения специальных (профильных) дисциплин: «Технология сварки плавлением», «Технология сварки в нефтехимическом машиностроении», «Технология наплавки», «Наплавочные материалы».

Учебно-методическое пособие предназначено для бакалавров, обучающихся по направлению 15.03.01 «Машиностроение» с профилем подготовки «Оборудование и технология сварочного производства».

© Волгоградский государственный  
Технический университет

## Оглавление

1. Расчетно-экспериментальная оценка режимов механизированной сварки конструкционных сталей .....	4
2. Расчетно-экспериментальная оценка режимов сварки и механических свойств швов закаливающихся сталей .....	21
3. Исследование технологических особенностей дуговой наплавки под флюсом колеблющимся электродом на установке У-653 .....	30
4. Исследование технологических особенностей электрошлаковой наплавки проволочным электродом на установке А-1401 .....	42
5. Изучение методики расчета теплового режима электрошлаковой наплавки в токоподводящем кристаллизаторе .....	54
6. Расчет режимов дуговой наплавки цилиндрических изделий из углеродистых низколегированных сталей .....	66
7. Изучение методики расчета состава порошковых проволок для сварки и наплавки .....	73
8. Изучение технологии изготовления наплавочных порошковых проволок на волочильном стане ОБ-575 .....	84

# 1. Расчетно-экспериментальная оценка режимов механизированной сварки конструкционных сталей

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить особенности расчета режимов механизированной дуговой сварки стыковых и угловых соединений и экспериментально оценить их влияние на формирование сварного шва.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

2.1. Изучить методику расчета параметров режима механизированной дуговой сварки под флюсом, в защитном газе и рассчитать основные параметры режима сварки для стыкового и таврового соединений.

2.2. Выполнить сварной шов, оценить рассчитанные значения основных параметров режима и, если необходимо, скорректировать их.

2.3. Сделать выводы о проделанной работе.

## 3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

К параметрам режима механизированной дуговой сварки под флюсом и в защитных газах, определяемых расчетом, относятся: сварочный ток ( $I_{св}$ ), напряжение на дуге ( $U_{д}$ ), скорость сварки ( $v_{св}$ ), диаметр ( $d_э$ ) и скорость подачи электродной проволоки ( $v_{пэ}$ ). Остальные параметры: защитная среда (газовая, шлаковая, газшлаковая), род и полярность тока, вылет электрода, 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. 3.1, а) глубиной проплавления ( $H$ ), шириной шва ( $e$ ), высотой усиления ( $g$ ), коэффициентом формы провара ( $\psi_{пр} = \frac{e}{H}$ ) и коэффициентом формы валика ( $\psi_{в} = \frac{e}{g}$ ).

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 расчета по чертежу, рекомендациям соответствующих ГОСТ или ОСТ устанавливают вид соединения, форму и размеры конструктивных элементов подготовки свариваемых 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 параметров режи-

ма сварки из условия обеспечения выбранных по соответствующему ГОСТу или ОСТу размеров шва в последовательности, определяемой типом соединения.

3.1. 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 в зависимости от толщины свариваемого металла  $S$ .

При односторонней однопроводной сварке на весу (рис. 3.1, а):

$$H = (0,7-0,8) \cdot S \quad (3.1)$$

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

$$H = S \quad (3.2)$$

на остающейся подкладке и в замковом соединениях

$$H - \text{не менее } S. \quad (3.3)$$

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

$$H_1 + H_2 = S + K \quad (3.4)$$

где  $K$  – величина перекрытия швов, она обычно равна 2-5 мм.

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

Если шов симметричный, то (рис. 3.1, б)

$$H_1 = H_2 = \frac{S + K}{2} \quad (3.5)$$

а если несимметричный, то глубина проплавления шва меньшего сечения равна (рис. 3.1, в)

$$H_l = (0,3-0,35) \cdot S \quad (3.6)$$

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

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

$$I_{св} = \frac{H_l}{K_h} 100 \quad (3.7)$$

где  $K_h$  – коэффициент пропорциональности, величина которого зависит от условий проведения сварки (табл. 3.1).

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

$$d_s = 1,13 \sqrt{\frac{I_{св}}{j}} \quad (3.8)$$

где  $j$  – допустимая плотность тока, А/мм<sup>2</sup>, которая при механизированной сварке стыковых соединений без скоса кромок зависит от диаметра электрода (табл. 3.2).

Таблица 3.1.

Значения  $K_h$  в зависимости от условий сварки

Марка флюса или защитного газа	Диаметр электродной проволоки, мм	$K_h$ , мм/100 А при сварке на		
		переменном токе	прямой полярности	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 3.2.

Значения  $j$  в зависимости от  $d_3$

$d_3$ , мм	1	2	3	4	5	6
$j$ , А/мм <sup>2</sup>	90-400	65-200	45-90	35-60	30-60	25-45

Полученное расчетное значение  $d_3$  округляется до ближайшего целого.

4) Определяют напряжение на дуге

$$U_d = 20 + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{d_3^{0,5}} I_{св} \pm 1. \quad (3.9)$$

5) Определяю скорость сварки  $v_{св}$  из условия обеспечения такой формы шва, при которой последний будет иметь высокую работоспособность и стойкость к кристаллизационным трещинам. Это возможно, когда коэффициент формы ванны  $\varphi = L / e$  ( $L$  – длина ванны,  $e$  – ширина ванны) на различных режимах сварки остается неизменным. Согласно теории рас-

пространения тепла при сварке для сохранения геометрического подобия ванны необходимо обеспечить

$$I_{CB} \cdot v_{CB} = A = const. \quad (3.10)$$

Для получения швов требуемой формы, обладающих высокой технологической прочностью, значения  $A$  принимают в пределах, приведенных в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Значения  $A$  в зависимости от  $d_э$

$d_э$ , 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)

$$v_{CB} = \frac{A}{I_{CB}}. \quad (3.11)$$

Необходимо знать, что в условиях без применения особых технологических приемов скорость сварки должна находиться в пределах 15-60 м/ч, а расчетные значения скорости сварки должны округляться до ближайших величин, которые можно установить на выбранном для сварки автомате.

6) Рассчитывают погонную энергию  $q_{II}$ , по формуле  $q_{II} = \frac{0,24 \cdot I_{CB} \cdot U_d \cdot \eta_э}{v_{CB}}$ , принимая значения эффективного к.п.д. нагрева изделия дугой при сварке под флюсом,  $\eta_э = 0,85-0,95$  при сварке в углекислом газе  $\eta_э = 0,80-0,84$ ;  $v_{CB}$  - скорость сварки, см/с.

7) Определяют коэффициент формы провара

$$\psi_{np} = k' \cdot (19 - 0,01 \cdot I_{CB}) \cdot \frac{d_э \cdot U_s}{I_{CB}}, \quad (3.12)$$

где  $d_э$  – диаметр электродной проволоки в мм, а значения  $k'$  находятся из табл. 3.4.

Таблица 3.4

Значения  $k'$  в зависимости от рода и полярности тока

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

Для механизированной сварки коэффициент провара должен находиться в пределах 0,8-4,0. При меньших его значениях будут получаться швы, склонные к образованию горячих трещин, а 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  $H$  (мм): при сварке под флюсом низкоуглеродистых и низколегированных сталей

$$H = 0,0156 \sqrt{\frac{q_n}{\psi_{пр}}}, \quad (3.13)$$

при сварке тех же сталей в углекислом газе

$$H = 0,0165 \sqrt{\frac{q_n}{\psi_{пр}}}, \quad (3.14)$$

в общем случае при сварке других материалов

$$H = 2 \sqrt{\frac{q_n}{\pi \cdot e \cdot c \cdot \gamma \cdot T_{пл} \psi_{пр}}} \quad (3.15)$$

где  $e = 2,718$  – основание натуральных логарифмов,  $q_n$  – погонная энергия сварки, Дж/м;  $c\gamma$  – объемная теплоемкость свариваемого металла, Дж/м<sup>3</sup>;  $T_{пл}$  – температура плавления свариваемого металла, °С;

9) Определяют ширину шва  $e$  (мм)

$$e = \psi_{пр} \cdot H. \quad (3.16)$$

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  $\alpha_n$ .

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

Значение  $\alpha_p$  состоит из двух слагаемых

$$\alpha_p = \alpha_p^s + \alpha_p^T \quad (3.17)$$

где  $\alpha_p^s$  – составляющая коэффициента расплавления, обусловленная тепловложением дуги, г/А×ч;  $\alpha_p^T$  – составляющая коэффициента расплавления, зависящая от тепловложения вследствие предварительного нагрева вылета электрода протекающим током, г/А×ч.

При сварке постоянным током обратной полярности

$$\alpha_p^s = 11,6 \pm 0,4 \quad (3.18)$$

При сварке переменным и постоянным током прямой полярности

$$\alpha_p^g = A + B \frac{I_{CB}}{d_3}, \quad (3.19)$$

где  $d_3$  – диаметр электродной проволоки, мм;  $A, B$  – коэффициенты, значения которых приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Значение коэффициентов  $A$  и  $B$  в зависимости от рода тока

род тока	коэффициент	
	$A$	$B$
Постоянный прямой полярности	6,3	0,065
переменный	7,0	0,04

Величина составляющей  $\alpha_p^T$  может быть рассчитана по уравнению

$$\alpha_p^T = 3,1 \cdot 10^{-4} \sqrt{I_{CB}} \frac{l}{d_3^2} \quad (3.20)$$

где  $l$  и  $d_3$  – вылет и диаметр электрода в мм.

При сварке в углекислом газе

$$\alpha_H = \alpha_p (1 - \psi), \quad (3.21)$$

где  $\psi$  – коэффициент потерь металла.

Коэффициент расплавления  $\alpha_p$  рассчитывают по формуле (г/А×ч).

$$\alpha_p = 9,05 + 3,1 \cdot 10^{-4} \sqrt{I_{CB}} \frac{l}{d_3^2} \quad (3.22)$$

где  $l$  и  $d_3$  – вылет и диаметр электрода в мм.

Коэффициент потерь в диапазоне плотностей тока 60-320 А/мм<sup>2</sup> равен:

$$\psi = 4,72 + 17,6 \cdot 10^{-2} j - 4,48 \cdot 10^{-4} j^2. \quad (3.23)$$

12) Определяет скорость подачи электродной проволоки (м/ч)

$$v_{п.э} = \frac{4 \cdot \alpha_H \cdot I_{CB}}{\pi \cdot d_3^2 \cdot \gamma} \quad (3.24)$$

где  $d_3$  – диаметр электродной проволоки, см;  $\gamma$  – удельный вес металла, г/см<sup>3</sup>.

Скорость подачи электродной проволоки  $v_{п.э}$  окончательно принимают с учетом технической характеристики автомата, на которой будет производиться сварка.

13) Определяют площадь наплавленного металла (см<sup>2</sup>)

$$F_H = \frac{\alpha_H \cdot I_{CB}}{3600 \cdot \gamma \cdot v_{CB}} \quad (3.25)$$

где  $v_{CB}$  – скорость сварки, см/с;  $\gamma$  – удельная масса металла, г/см<sup>3</sup>.

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  $\mu_B = 0,73$ . Тогда высота валика равна (мм).

$$g = \frac{F_H}{0,73 \cdot e}, \quad (3.26)$$

где  $e$  – ширина шва, мм;  $F_H$  – площадь наплавленного металла (мм<sup>2</sup>).

15) Определяют общую высоту шва  $C$  (мм)

$$C = H + g \quad (3.27)$$

16) Определяют коэффициент формы усиления шва

$$\psi_B = \frac{e}{g}. \quad (3.28)$$

Для хорошо сформированных швов  $\psi_B$  должен находиться в пределах 7-10. Малые значения  $\psi_B$  характерны для узких и высоких швов, такие швы не имеют плавного сопряжения с основным металлом, и обладают неудовлетворительной работоспособностью при переменных нагрузках. Большие значения  $\psi_B$  соответствуют швам с широкими и низкими усилениями. Такие швы не рекомендованы по тем же причинам, - что и швы с чрезмерно большими значениями  $\psi_B$ . Если полученные в расчете размеры шва удовлетворяют поставленным требованиям, то аналогично, рассчитывают режим сварки с другой стороны. При необходимости производят корректировку режима сварки.

### 3.2 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 остается практически неизменными, т.е.  $C = H + g = const$ .

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

1) Определяют режим сварки и размеры шва по формулам (3.1-3.26), 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, флюсомедной подушек, медного ползуна, остающейся подкладки учитывают выражение (3.2), а если соединение двухстороннее, то выражения (3.4 и 3.5).

2) Определяют количество наплавленного металла, необходимое для образования валика заданных размеров  $F'''$ . В общем случае оно равно (рис. 3.2, а)

$$F''' = F_H - 2F' - F'' = F_H - h^2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - C \cdot B \quad (3.29)$$

где  $F_H$  – количество наплавленного металла на рассчитанном режиме по формуле (3.25);  $F'$ ,  $F''$ ,  $F'''$  – количество наплавленного металла, идущее, соответственно, на заполнение разделки, зазора и усиления шва.

3) Определяют высоту усиления  $g'$  при наличии разделки и зазора (рис. 3.2, а)

$$g' = \frac{F'''}{0,73 \cdot e - B} = \frac{F_H - h^2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - C \cdot B}{0,73 \cdot e - B}, \quad (3.30)$$

При наличии лишь зазора и отсутствии разделки ( $h = 0$ ) (рис. 3.2,б)

$$g' = \frac{F_H - C \cdot B}{0,73 \cdot e - B}, \quad (3.31)$$

При наличии разделки и отсутствии зазора ( $B = 0$ ) (рис. 3.2,в)

$$g' = \frac{F_H - h^2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{0,73 \cdot e}, \quad (3.32)$$

4) Определяют  $H'$ .

$$H' = C - g'. \quad (3.27')$$

Полученное значение  $H'$  сопоставляют с заданным значением (п.1, раздел 3.2), и при значительных отклонениях корректируют режим сварки.

### 3.3. 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 первый 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  $S$ , мм.

При двухсторонней сварке требуемая глубина провара  $H'_0$  устанавливается в соответствии с формулами (3.4, 3.5), подставляя в них значение  $S$  вместо  $S$  (рис. 3.3).

2) Выбирают для первого прохода диаметр электродной проволоки (табл. 3.2), задавая значением  $j$ .

3) Рассчитывает величину сварочного тока  $I_{CB}$  (А):

$$I_{CB} = \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} j, \quad (3.33)$$

где  $j$  – допустимая плотность тока в электроде (А/мм), берут значения, близкие к минимальному пределу допустимых плотностей тока, (табл. 3.2).

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

5) Определяют высоту усиления  $g'_0$  (рис. 3.3) по формуле (мм)

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

где  $F_H$  – площадь поперечного сечения металла, наплавленного за данный проход, определяется по формуле (3.25), мм<sup>2</sup>.

6) Определяют  $H'_0$

$$H'_0 = C'_0 - g'_0 \quad (3.34'')$$

Полученное значение  $H'_0$  сопоставляют с заданным значением (п.1, раздела 3.3) и при значительных расхождениях корректируют режим сварки.

7) Выбирают режим сварки первым проходом с другой стороны шва, исходя из условия обеспечения провара притупления (рис. 3.3), т.е.

$$H'_0 + H''_0 = c + x, \quad (3.35)$$

где  $c$  – величина притупления,  $x$  – перекрытие.

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

8) Рассчитывают режим сварки последующих проходов и размеры шва по формулам (3.7-3.24) 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 шва.

Скорость сварки  $v_{CB}$  рассчитывают из условий обеспечения равенства (3.10) и необходимого количества наплавленного металла за один проход ( $F_H^{посл}$ ) по формуле (см /с):

$$v_{CB} = \frac{\alpha_H \cdot I_{CB}}{3600 \cdot \gamma \cdot (F_H^{посл})'} \quad (3.36)$$

где размерности всех величин те же, что и в формуле (3.25). При этом максимальное сечение одного прохода не должно превышать 100 мм<sup>2</sup>.

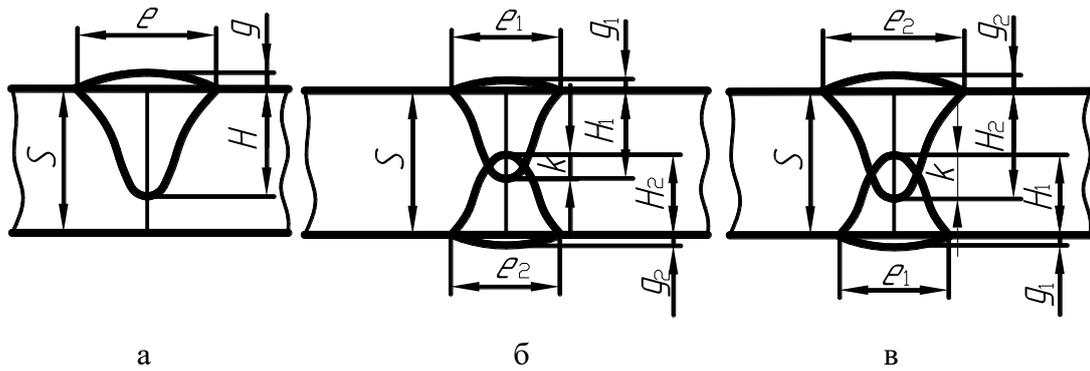


Рис. 3.1 Контур стыкового сварного соединения  
 а – односторонний на весу; б – двухсторонний симметричный;  
 в – двухсторонний несимметричный.

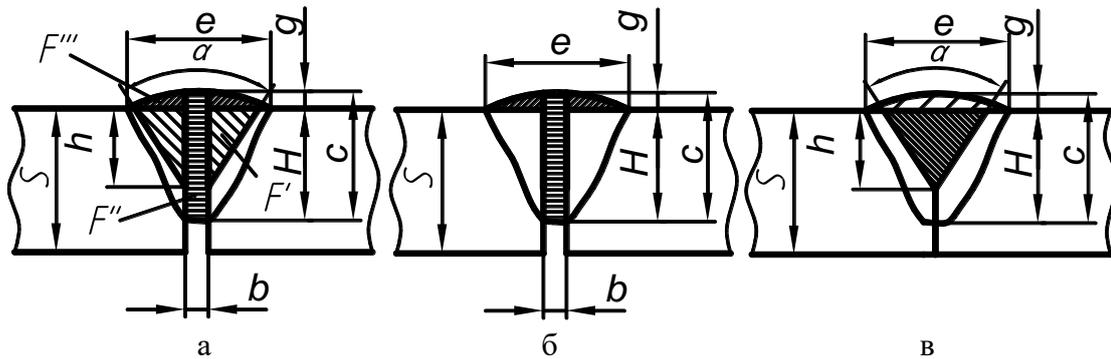


Рис. 3.2. Схема измерения размеров шва при наличии:  
 а – разделки и зазора; б – зазора; в – разделки.

9) Определяют площадь поперечного сечения последующих проходов при двусторонней сварке (см<sup>2</sup>).  
 с первой стороны шва (рис. 3.3)

$$F_H^{посл} = (h - g'_0)[B + (h + g'_0) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}] + 0,73e_1 \cdot g_1; \quad (3.37)$$

со второй стороны шва (рис. 3.3)

$$F_H^{посл} = (h - g''_0)[B + (h + g''_0) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}] + 0,73e_2 \cdot g_2; \quad (3.38)$$

где  $g''_0$  – определяется аналогично  $g'_0$ : $\alpha$

$$g''_0 = \sqrt{\frac{F_H - C'' \cdot B}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}}; \quad (3.39)$$

В формулах (3.34-3.38)  $B, c, h, \alpha$  – 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 (3.37), подставив в нее вместо  $g'_0$  величину  $(z - c)$ , полученную из рис. 3.2.

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

$$n = \frac{F_n^{посл}}{(F_n^{посл})'} \quad (3.40)$$

где  $(F_n^{посл})'$  – площадь поперечного сечения наплавленного металла за один проход (формула 3.36).

#### 3.4. 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. 3.4). Однако при его выборе необходимо учитывать некоторые специфические особенности формирования угловых швов, а именно: при получении плоских или выпуклых швов ширине шва всегда должна быть равна расстоянию по горизонтали между свариваемыми деталями (рис. 3.4, а). Если ширина шва будет больше этого расстояния, то неизбежны подрезы (рис. 3.4, б). Поэтому коэффициент формы углового шва, равный отношению ширины шва к общей высоте его ( $\psi = \frac{e}{c}$ ), должен быть не больше 2. Вместе с тем слишком глубокие и узкие швы (с малым коэффициентом формы) склонны к образованию горячих трещин.

Практикой установлено, что угловые швы удовлетворительно формируются на режимах, при которых плотность тока в электроде находится в пределах средних значений, указанных в табл. 3.6.

Таблица 3.6

#### Допустимые плотности тока при сварке угловых швов

Диаметр электрода, мм	2	3	4	5
Допустимая плотность тока $j$ , А/мм <sup>2</sup>	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:

$$F_n = \frac{K^2}{2}; \quad (3.41)$$

2) Выбирают диаметр электрода. При его выборе необходимо учитывать, что угловые швы с катетом 3-4 мм можно получать лишь при использовании электродной проволоки диаметром не более 2 мм; минимальный

катет 5-6 км обеспечивается при сварке электродной проволокой диаметром в интервале 3-5 мм. Сварочную проволоку диаметром более 5 мм, не обеспечивающую провар вершины углового шва, применять не рекомендуется.

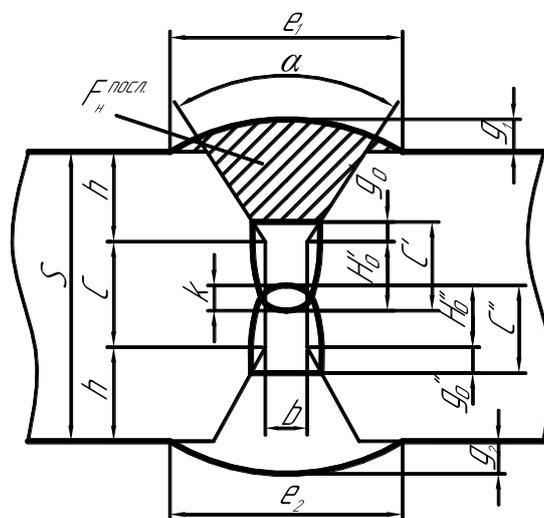


Рис 3.3. Схема, поясняющая расчет площади наплавленного металла, необходимого для заполнения X-образной разделки.

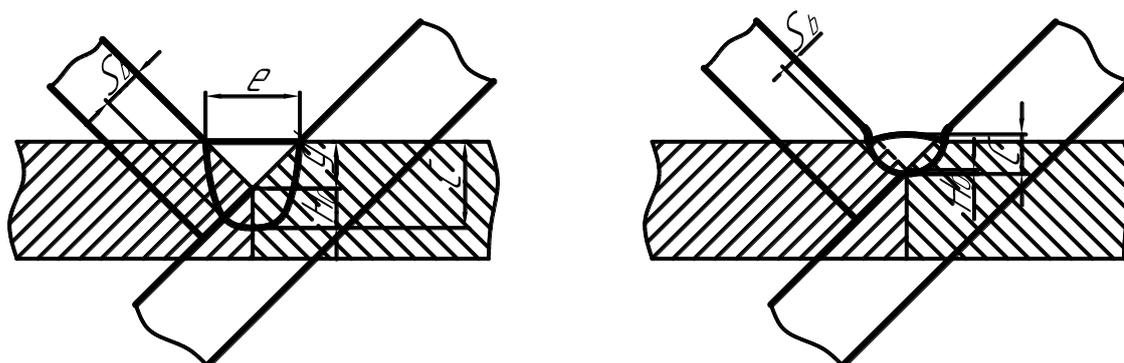


Рис. 3.4. Схемы формирования углового шва при сварке в лодочку  
а – удовлетворительное; б – подрезы.

3) Для принятого диаметра электрода по табл. 3.6 подбирают плотность тока и по формуле (3.33) определяют сварочный ток. К определению  $g'_0, H'_0, F_H^{посл}$  при многослойной сварке.

4) Рассчитывают по формулам (3.17-3.23) коэффициент наплавки  $\alpha_H$ .

5) Определяют по формуле (3.25) скорость сварки, обеспечивающую при данной, величине сварочного тока требуемую площадь наплавки  $F_H$ .

6) Рассчитывают критический ток (рис. 3.5) для определения формы поверхности шва (плоская, вогнутая или выпуклая) по формуле:

$$I_{кр} = I_0 + m \cdot v_{св}, \quad (3.42)$$

где  $I_{кр}$  – Критический сварочный ток, т.е. такой ток, при котором для данной скорости сварки получается шов с плоской поверхностью;  $I_0$  – услов-

ный критический ток при нулевой скорости сварки, для механизированной сварки  $I_0 = 350$  А;  $m$  – коэффициент, характеризующий наклон прямой (табл. 3.7).

Таблица 3.7

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 (3.9) находят напряжение дуги и по (3.12) – коэффициент формы провара. При этом необходимо иметь, в виду, что напряжение дуги следует выбирать ближе к нижнему пределу диапазона оптимальных значений.

8) Принимают значения  $\eta_u$  из п.6 раздела 3.1, определяют погонную энергию  $q_n$ .

9) Определяют основные размеры, шва при сварке стыкового бесконечного соединения на принятом режиме: глубину провара  $H$  по формулам (3.13-3.15), ширину шва  $e$  и высоту валика  $g$  по (3.16 и 3.26), общую высоту шва  $C$  по (3.27). При этом  $e$  должна равняться расстоянию по горизонтали между свариваемыми деталями.

10) Определяют коэффициент формы углового шва

$$\psi = \frac{e}{C}, \quad (3.43)$$

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(3.32). При отсутствии зазора ( $v = 0$ ) и  $\alpha = 90^0$

$$g' = \sqrt{F_H}. \quad (3.44)$$

Тогда глубину проплавления  $H'_0$  определяют по формуле (рис. 3.4)

$$H'_0 = C - g' \quad (3.45)$$

12) Определяют глубину проплавления вертикальной стенки

$$H_B = (0,8 - 1,0) \cdot H'_0 \quad (3.46)$$

Если предъявляется требование обеспечить сплошной провар стенки тавра, а при максимально допустимой плотности тока обеспечить требуемую глубину проплавления невозможно, то используют разделку кромок.

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

### 3.5. 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 ощутимого общего повышения твердости не наблюдается. Свойства сварных соединений таких сталей основной определяются степенью развития рекристаллизации и огрубления структуры околошовной зоны и шва. Поэтому в качестве основного расчетного критерия определения режимов сварки используют скорость охлаждения  $\omega_{охл}$  внутри некоторого оптимального интервала  $\Delta\omega_{опт.}$  (табл. 3.8), который обычно устанавливают по данным валиковой пробы таких образом, чтобы ударная вязкость в ЗТВ при отрицательных температурах была не ниже 30 Дж/см.

Низколегированные низкоуглеродистые стали типа 09Г2, 10Г2У содержат повышенное количество марганца, что снижает критическую скорость охлаждения при сварке. Пониженное содержание углерода в них предопределяет практически отсутствие мартенситного распада.

По известной погонной энергии рассчитанного режима сварки определяют фактическую скорость охлаждения околошовной зоны при температуре наименьшей устойчивости аустенита ( $T_m = 500-600$  °С).

Расчет фактической скорости охлаждения околошовной зона производят на основе теории распространения тепла при сварке, разработанной академиком Н. Н. Рыкалиным по следующим формулам:

при наплавке валике на массивное тело

$$\omega_{охл.} = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \frac{(T_m - T_0)^2}{q_n}, \quad (3.47)$$

при однопроходной сварке листов встык со сквозным проплавлением

$$\omega_{охл.} = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \gamma \frac{(T_m - T_0)^3}{(q_n / S)^2}, \quad (3.48)$$

где  $\omega_{охл.}$  – мгновенная скорость охлаждения при температуре  $T_m$ , °С/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Дж/м×с °С;  $c\gamma$  – объемная теплоемкость, Дж/м<sup>3</sup>. °С;  $T_0$  – начальная температура изделия, °С;  $S$  – толщина свариваем-

мого металла, м;  $q_n$  – погонная энергия (Дж/м), определяется в соответствии с п.6 раздела 3.1.

Таблица 3.8

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

Сталь	Оптимальный интервал скорости охлаждения			Количество мартенсита, %, соотв. пределам $\Delta\omega_{ОПТ.}$	НВ, соответствующая пределам $\Delta\omega_{ОПТ.}$
	$^{\circ}\text{C}/\text{с}$ $\Delta\omega_{ОПТ.}$	По каким свойствам выбран	По какой, пробе выбран		
Ст2	6-18	$\alpha_H \geq 50 \text{ Дж} / \text{см}^2$ (При $-60^{\circ}\text{C}$ )	Валиковая (S = 20 мм)	–	155-170
Ст3кп	1,2-12	$\alpha_H \geq 20 \text{ Дж} / \text{см}^2$ (При $-50^{\circ}\text{C}$ )	Валиковая (S = 12 мм)	–	–
БСт3	1,4-15	$\alpha_H \geq 50 \text{ Дж} / \text{см}^2$ (При $-50^{\circ}\text{C}$ )	Валиковая (S = 12 мм)	–	155-165
О9Г2	1,0-15,0	$\alpha_H \geq 30 \text{ Дж} / \text{см}^2$ (При $-60^{\circ}\text{C}$ )	Валиковая (S = 12 мм)	–	215-185
10Г2У	0,7-3,8	$\alpha_H \geq 40 \text{ Дж} / \text{см}^2$ (При $-60^{\circ}\text{C}$ )	Валиковая (S = 10 мм)	–	205-180
14Г2	1,0-1,2	$\alpha_H \geq 20 \text{ Дж} / \text{см}^2$ (При $-70^{\circ}\text{C}$ )	Валиковая (S = 20 мм)	–	255-270
16ГС	1,0-12,0	$\alpha_H \geq 20 \text{ Дж} / \text{см}^2$ (При $-60^{\circ}\text{C}$ )	Валиковая (S = 20 мм)	–	190-225
17ГС	10-30	$\alpha_H \geq 40 \text{ Дж} / \text{см}^2$ (При $-60^{\circ}\text{C}$ )	Валиковая (S = 11 мм)	–	225-235
10Г2СД	1,0-15	$\alpha_H \geq 20 \text{ Дж} / \text{см}^2$ (При $-60^{\circ}\text{C}$ )	Валиковая (S = 12 мм)	–	185-250
14ХГ2	1,2-5,5	$\alpha_H \geq 20 \text{ Дж} / \text{см}^2$ (При $-50^{\circ}\text{C}$ )	Валиковая (S = 20 мм)	–	325-335
10ХСНД	0,8-15	$\alpha_H \geq 20 \text{ Дж} / \text{см}^2$ (При $-50^{\circ}\text{C}$ )	Валиковая (S = 18 мм)	–	250-275
15ХСНД	1,8-9,0	$\alpha_H \geq 7 \text{ Дж} / \text{см}^2$ (При $+50^{\circ}\text{C}$ )	Валиковая (S = 16 мм)	–	230-250

## 4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

### 4.1 Материалы и оборудование

- 1) Автомат для сварки под флюсом или в углекислом газе с источником питания переменным и постоянным током. Флюсовая аппаратура и баллон с двуокисью углерода.
- 2) Образцы, изготовленные из низкоуглеродистой стали толщиной 8 мм.
- 3) Электродная проволока марки Св-08ГС или Св-08Г2С диаметром 0,8-1,6 мм, либо марки Св-08А диаметром 2,0-5,0 мм.
- 4) Молоток, зубило, металлическая и волосяная щетки, напильник, плоскогубцы, клещи, металлическая линейка, рукавицы, очки с защитными стеклами, щиток или маска.

### 4.2. Последовательность выполнения работы

1. Изучить методические указания и получить допуск на выполнение работы.
2. По заданному способу сварки, значениям диаметра электродной проволоки и типу разделки рассчитать основные параметры механизированной дуговой сварки.
3. Подготовить к работе сварочный автомат, настроив его на рассчитанный режим сварки.
4. Произвести сварку, контролируя силу сварочного тока, напряжение на дуге, описать и проанализировать результаты эксперимента и, при необходимости, скорректировать рассчитанные параметры режима.
5. Охлажденную пластину сломать на прессе. На торцы пластин наложить кальку и обвести контуры швов. Наложить снятые на кальку контуры поперечных сечений валиков на миллиметровую бумагу и определить геометрические параметры шва  $H$ ,  $e$ ,  $g$ ,  $C$ .
6. Обеспечивающие качественное формирование сварного шва параметры режима сварки занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

Результаты	Параметры режима сварки								Размеры шва					
	Род и полярность тока	Флюс	$d_э$	$I_{св}$	$U_д$	$V_{св}$	$V_n$	$l$	$H$	$e$	$g$	$C$	$\Psi_{np}$	$\Psi_в$
			мм	A	B	м/ч	м/ч	мм						
Расчетные														
Опытные														

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по работе оформляется в соответствии с установленными требованиями и должен содержать следующие пункты

- цель и задачи работы;
- исходные данные (способ сварки, марка свариваемой стали, диаметр электродной проволоки и тип разделки), порядок расчета и его результаты представленные в виде таблицы;
- эскиз сваренного образца с указанием его размеров, а также размеров валиков;
- выводы по работе, включающие анализ влияния основных параметров режима сварки ( $I_{св}$ ;  $U_{д}$ ;  $v_{св}$ ;  $V_{п}$ ) на качество формирования сварного шва.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как влияют на форму наплавляемого валика ток, напряжение на дуге и скорость сварки?
2. Как рассчитывают коэффициент формы валика?
3. Что характеризует коэффициент формы валика?
4. Изменением каких параметров режима дуговой сварки можно снизить долю участия  $\gamma_0$  основного металла в металле сварного шва?
5. Из каких условий определяется количество проходов при сварке стыковых соединений?
6. Что характеризует коэффициент наплавки и какие параметры режима влияют на его величину?
7. От чего зависит и как влияет на качество сварного шва погонная энергия сварки?
8. Почему для сварки в  $CO_2$  низкоуглеродистой и низколегированной стали применяют сварочные проволоки, легированные марганцем и кремнием?
9. Как влияет процесс диссоциации  $CO_2$  на условие существования дуги и выбор рода тока?

## 7. РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки / Под. ред. А. И. Акулова ; М. : Машиностроение, 2003. – 432 с.
2. Соединение типовых деталей с задачами и примерами расчетов [Текст] : учеб. пособие / П. Н. Учаев [и др.] ; под ред. П. Н. Учаева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол : ТНТ, 2010. – 151 с.
3. Сварка и свариваемые материалы: В 3-х т. Т.1. Свариваемость материалов / Под ред. Э. Л. Макарова ; М.: Металлургия, 1991. – 528 с.

4. Потапьевский, А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. – Киев. Екотехнологія, 2007. – 192 с.

## **2. Расчетно-экспериментальная оценка режимов сварки и механических свойств швов закаливающихся сталей**

### **1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Изучить особенности выбора критериев для расчета режимов сварки закаливающихся сталей, обеспечивающие требуемые механические свойства в сварном соединении.

### **2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

2.1. Изучить особенности выбора критериев для расчета режима дуговой сварки закаливающихся сталей.

2.2. Освоить расчет ожидаемых механических свойств сварного соединения.

2.3. Оценить рассчитанный режим сварки по характеру структуры в зоне термического влияния сварного соединения из закаливающейся стали.

2.3. Сделать выводы о проделанной работе.

### **3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

К сталям, закаливающимся в условиях сварки могут быть отнесены углеродистые и легированные стали. Примерами марок закаливающихся сталей могут служить 35X, 40X, 35Г2, 40Г2, 30ХГТ, 30ХГНА, 30ХГСА и др. По чувствительности к термомодеформационному 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, 20ХН, 20ХМА, 12Х1МФ, 15Х1МФ, 12Х5МА, 20Х2МА, 30ХМА и др.

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

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 подвергают 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 прини-

мают скорость охлаждения  $\omega_{охл}$  околошовной зоны внутри интервала скоростей охлаждения  $\omega_{охл}$  (табл. 3.1), в котором достигается оптимальное сочетание механических свойств в ЗТВ и шве. Чтобы предупредить опасность образования холодных трещин, скорость охлаждения  $\omega_{охл}$  следует назначать с учетом допустимых скоростей охлаждения  $\omega_{\delta}$  (табл. 3.2), которая в зависимости от типа стали и жесткости сварного соединения может в большей или меньшей мере ограничивать диапазон приемлемых скоростей охлаждения внутри интервала  $\omega_{охл}$ .

Если сталь перед сваркой подвергают термообработке. А после сварки - отпуска для снятия напряжений и выравнивания механических свойств, сварного соединения с целью обеспечения его равнопрочности с основным металлом или сталь перед сваркой подвергают 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  $\omega_{\delta}$  (табл. 3.2), гарантирующую отсутствие трещин в околошовной зоне и шве.

При сварке стали со средней устойчивостью аустенита выбранный по  $\omega_{\delta}$  режим часто требует корректировки для получения заданных механических свойств. В этом случае дополнительным критерием служит интервал скоростей охлаждения  $\omega_{опт}$  (табл. 3.1), в котором обеспечиваются оптимальные механические свойства в околошовной зоне, а других участках соединения до и особенно после отпуска.

Последовательность расчета режимов сварки закаливаемых сталей:

1) Рассчитывают параметра режима сварки, исходя, из условия нормального формирования шва по методике, изложенной в методических указаниях к лабораторной работе № 1.

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

При наплавке валике на массивное тело

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

при однопроходной сварке листов встык со сквозным проплавлением

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

где  $\omega_{охл.}$  – мгновенная скорость охлаждения при температуре  $T_m, ^\circ\text{C}/\text{с}$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Дж/м $\times$ с  $^\circ\text{C}$ ;  $c\gamma$  – объемная теплоемкость,

Дж/м<sup>3</sup>. °С;  $T_0$  – начальная температура изделия, °С;  $T_m$  – температура наименьшей устойчивости аустенита ( $T_m = 500-600$  °С), °С  $S$  – толщина свариваемого металла, м;  $q_n$  – погонная энергия (Дж/м).

Таблица 3.1

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

Сталь	Оптимальный интервал скоростей охлаждения			Количество мартенсита, % соответ. Пределам $\Delta\omega_{охл}$	Твердость НВ, соответ. пределам $\omega_{онт}$
	$\Delta\omega_{охл}$	По каким свойствам выбран (при 20 °С)	По какой, пробе выбран		
35	0,12-7,0	$\alpha_H \geq 20 \frac{Дж}{см^2}$	ИМЕТ-1	0-30	136-200
40	2,4-5,0	$\alpha_H \geq 60$	Валиковая (S = 16мм)	–	265-280
45	2,0-4,0	$\alpha_H \geq 35$	–  –	5	230-250
40X	4,0-14,0	$\alpha_H \geq 50$	–  –	75-90	340-460
12МХ	2-100	$\psi \geq 40$	ИМЕТ-1	0-50	156-275
30ХМА	0,1-10	$\psi \geq 30$ ; $\delta \geq 12$	–  –	0-15	190-250
35ХМ	1-5	$\psi \geq 25$	–  –	0-40	230-340
40ХМА	$\leq 0,7$	$\psi \geq 20$	–  –	50	
25НЗ	0,8-70	$\alpha_H \geq 50$	Валиковая (S = 16мм)	0-100	175-455
20НГСА	1,6-70	$\psi \geq 25$	ИМЕТ-1	0-100	250-450
25НГСА	0,07-1,3	$\psi \geq 20$	–  –	–	170-250
30НГСА	1,6-60	$\psi \geq 22$	–  –	0-80	345-450
35НГСА	1,5-7,0	$\alpha_H \geq 50$	Валиковая (S =	30-90	400-450

Сталь	Оптимальный интервал скоростей охлаждения			Количество мартенсита, % соответ. Пределам $\Delta\omega_{охл}$	Твердость НВ, соответ. пределам $\omega_{онт}$
	$\Delta\omega_{охл}$	По каким свойствам выбран (при 20 °С)	По какой, пробе выбран		
			16мм)		
20Х2МФ	1-25	$\psi \geq 40$	ИМЕТ-1	0-30	270-425
Х5М	0,8-8,0	$\psi \geq 25$	-  -	-	340-370
15Х11МФ	$\leq 40$	$\psi \geq 20$	-  -	0-100	395
15Х12ВМФ	$\leq 25$	$\psi \geq 12$	-  -	0-100	395
12Х13	Не ограничивается	$\psi \geq 17$	-  -	0-100	380

Сталь, для которой  $\omega_0$  не указаны, практически не склонна к образованию трещин в пределах  $\Delta\omega_{охл}$ .

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

Если в результате расчета окажется, что скорость охлаждения основного металла  $\omega_{охл}$  выше допустимой, скорости охлаждения  $\omega_0$  или же находится вне диапазона оптимальных скоростей для данной сварки 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  $\omega_{охл}$  подставляют значение допустимой скорости охлаждения  $\omega_0$ .

4) Оценивают механические свойства сварного соединения.

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.

Таблица 3.2

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

Сталь	Проба CTS			Крестовая проба		
	Допустимая скорость охлаждения $\omega_{\delta}$ °C/c	Допустимое количество мартенсита, %	Допустимая твердость НВ	Допустимая скорость охлаждения $\omega_{\delta}$ °C/c	Допустимое количество мартенсита, %	Допустимая твердость НВ
45	15	80	400	8	30	375
40X	5,5	80	470	2,5*	55	390
35ХМ	15	70	430	—	—	—
40ХМА	—	—	—	6*	90	467
25НЗ	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 \*  $\omega_{\delta}$  при условии сопутствующего подогрева не ниже 250 °C для стали 40ХМА, не ниже 200 °C для сталей типа Х12 и не ниже 100 °C для сталей 40Х, 30ХГСА.

Непосредственное определение механических характеристик металла шва установило коэффициента влияния каждой элемента и позволило составить эмпирические уравнения для расчёта ожидаемых механических характеристик металла сварных низколегированных швов в следующем виде:

$$\sigma_B = 4,8 + 50C + 25,2Mn + 17,5Si + 23,9Cr + 7,7Ni + 8,0W + 70Ti + 17,6Cu + 29Al + 16,8Mo \quad (3.4)$$

для относительного удлинения шва, %

$$\delta_{ш} = 50,4 - (21,8C + 15Mn + 49Si + 2,4Ni + 5,8Cr + 6,2Cu + 2,2W + 6,6Ti) + 17,1Al + 2,7Mo \quad (3.5)$$

для ударной вязкости шва при  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , кгс/см<sup>2</sup>

$$\sigma_{нш} = 23,3 - (25,7C + 6,4Mn + 8,4Si + 2,4Cr + 1,6Ni + 4Cu + 0,5W + 1,4Mo + 15,4Ti) + 18Al \quad (3.6)$$

для предела текучести шва, кгс/мм<sup>2</sup>

$$\sigma_{тш} = 0,73\sigma_{вш} \quad (3.7)$$

для относительного поперечного сужения, %

$$\psi_{ш} = 2,32\delta_{ш} \quad (3.8)$$

В этих формулах значение каждого компонента принято в процентах.

Формулы (3.4-3.8) 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  $2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$  (т.е. отсутствует эффект закалки).

При больших скоростях охлаждения необходимо учитывать эффект закалки, используя данные рис. 3.1, на котором 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. 3.1) рассчитывают скорость охлаждения на принятом режиме.

Эквивалентное содержание углерода в шве подсчитывают по формуле:

$$C_3 = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{V}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2}, \quad (3.9)$$

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:

$$|X|_{ш} = \gamma_0 |X|_{ом} + (1 - \gamma_0) |X|_3 \pm \Delta X \quad (3.10)$$

где  $|X|_{ш}, |X|_{ом}, |X|_3$  – содержание рассматриваемого элемента в металле шва, основном и электродном металле;  $\Delta X$  – обобщенное изменение содержания данного элемента в составе основного и электродного металлов вследствие взаимодействия расплавленного металла с окружающей средой;  $\gamma_0$  – доля участия основного металла в формировании шва определяется по формуле:

$$\gamma_0 = \frac{F_{пр}}{F_{пр} + F_{н}}, \quad (3.11)$$

где  $F_H$  – площадь наплавленного металла, мм<sup>2</sup>;  $F_{пр}$  – площадь провара, определяется графически на основании рассчитанных габаритов валиков сварного шва и чертежа сварного соединения.

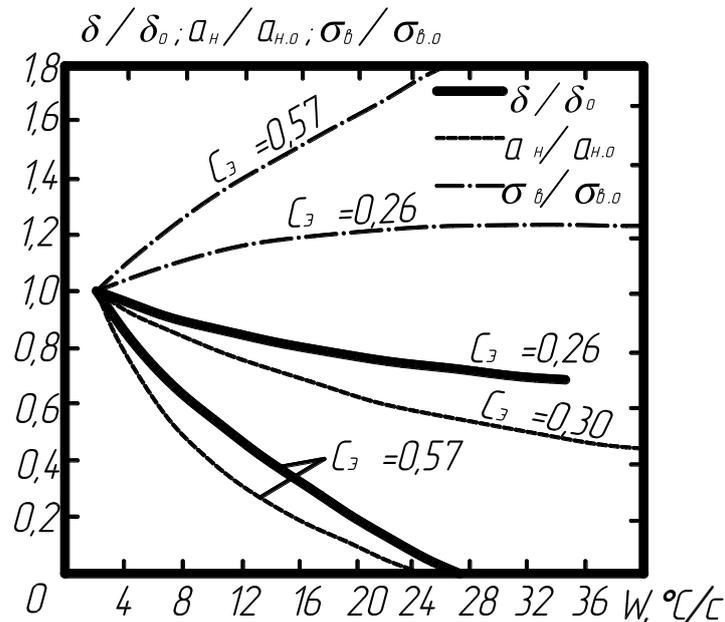


Рис. 3.2. Коэффициенты, учитывающие влияние скорости охлаждения металла шва на его механические свойства

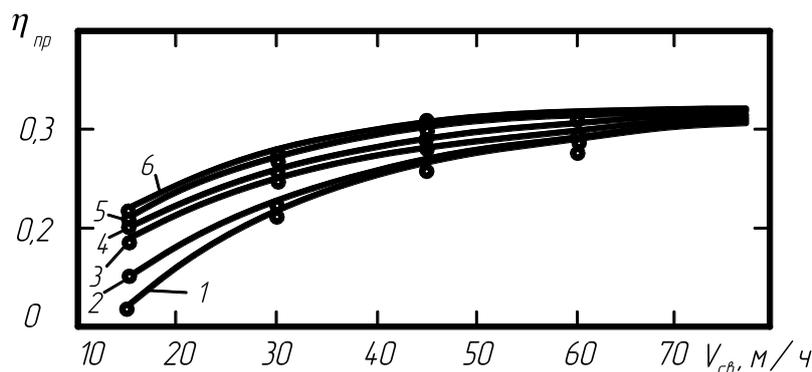


Рис. 3.3. Зависимости полного к.п.д. от скорости сварки и плотности тока в электроде (механизированная сварка под флюсом)

1 – 25 А/мм<sup>2</sup>; 2 – 30 А/мм<sup>2</sup>; 3 – 40 А/мм<sup>2</sup>; 4 – 80 А/мм<sup>2</sup>; 5 – 160 А/мм<sup>2</sup>; 6 – 250 А/мм<sup>2</sup>;  $\eta_{пр}$  – полный тепловой к.п.д., определяется в зависимости от скорости сварки и плотности тока в электроде

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

### 4.2. Материалы и оборудование

1) Автомат для сварки под флюсом или в углекислом газе с источником питания постоянным током. Флюсовая аппаратура и баллон с двуокисью углерода.

2) Образцы, изготовленные из стали 40Х, 12ХМ толщиной 10-18 мм.

3) Электродная проволока марки Св-08ХМ или Св-08А диаметром 0,8-1,6 мм, либо 2,0-5,0 мм.

4) Молоток, зубило, металлическая и волосяная щетки, напильник, плоскогубцы, клещи, металлическая линейка, рукавицы, очки с защитными стеклами, щиток или маска.

#### 4.3. Последовательность выполнения работы

1. Изучить методические указания и получить допуск на выполнение работы.

2. По заданному способу сварки, значениям диаметра электродной проволоки и типу разделки рассчитать основные параметры режима механизированной дуговой сварки.

3. Подготовить к работе сварочный автомат, настроив его на рассчитанный режим сварки.

4. Произвести сварку, контролируя силу сварочного тока, напряжение на дуге, описать и проанализировать результаты эксперимента и, при необходимости, скорректировать рассчитанные параметры режима.

5. Вырезать образец в поперечной плоскости к оси шва и подготовить образец для металлографического исследования на оптическом микроскопе.

6. Выявить структуру сварного соединения в ЗТВ и сделать вывод о допустимости рассчитанной погонной энергии сварки и качестве сварки.

7. Рассчитать прогнозируемые механические свойства сварного соединения.

### 4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по работе оформляется в соответствии с установленными требованиями и должен содержать следующие пункты

- цель и задачи работы;
- исходные данные (способ сварки, марка свариваемой стали, диаметр электродной проволоки и тип разделки), порядок расчета и его результаты представленные в виде таблицы;
- эскиз сваренного образца с указанием его размеров, а также размеров валиков;
- расчет критериев выбора режима сварки закаливающих сталей (допустимой скорости охлаждения, эквивалентного содержания углерода)
- выводы по работе, включающие анализ влияния основных параметров режима сварки ( $I_{св}$ ;  $U_d$ ;  $v_{св}$ ), эквивалентного содержания углерода и скорости охлаждения металла в зоне термического влияния на структуру и механические свойства сварного соединения из закаливающейся стали.

## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как влияют на механические свойства сварного соединения повышенное ( $> 0,25\%$ ) содержание углерода в стали, а также ее легирование стали хромом, молибденом?
2. От каких параметров режима зависит погонная энергия сварки?
3. Какими критериями нужно руководствоваться при выборе режима сварки закаливающейся стали?
4. Изменением каких параметров режима дуговой сварки можно снизить долю участия  $\gamma_0$  основного металла в металле сварного шва?
5. Что характеризует допустимый интервал скоростей охлаждения металла в ЗТВ?
6. Как влияет скорость охлаждения на временное сопротивление разрушению и ударную вязкость металла сварного соединения?
7. В каких случаях допускается определять механические свойства с использованием эмпирических формул?

## 6. РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки / Под. ред. А. И. Акулова ; М. : Машиностроение, 2003. – 432 с.
2. Сварка и свариваемые материалы: В 3-х т. Т.1. Свариваемость материалов / Под ред. Э. Л. Макарова ; М.: Металлургия, 1991. – 528 с.
3. Прыгаев, А. К. Металловедение и термическая обработка сварных соединений / А. К. Прыгаев, Л. А. Ефименко, О. Ю. Елагина. – М. : Логос, 2007. – 456 с.
4. Теория сварочных процессов / под ред. В. М. Неровного ; М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 752 с.

### **3. Исследование технологических особенностей дуговой наплавки под флюсом колеблющимся электродом на установке У-653**

#### **1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Изучить особенности технологии дуговой наплавки под флюсом колеблющимся электродом цилиндрических изделий и освоить методику расчета основных параметров режима наплавки.

Изучить конструкцию наплавочной установки У-653 и экспериментально исследовать влияние параметров режима наплавки на формирование наплавленного металла.

#### **2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

2.1. Изучить особенности технологии дуговой наплавки колеблющимся электродом цилиндрических тел и овладеть расчетным методом определения рационального режима наплавки.

2.2. Изучить конструкцию, технологические данные наплавочной установки У-653 и ее принципиальную электрическую схему.

2.3. Подготовить установку к работе и опробовать взаимодействие ее узлов в холостом режиме.

2.4. Экспериментально оценить влияние параметров режима наплавки колеблющимся электродом на формирование наплавленного металла.

2.5. Обработать экспериментальные результаты, обосновать оптимальный режим наплавки и сделать выводы по работе.

#### **3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ КОЛЕБЛЮЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ**

Производительность процесса наплавки определяется не только массой наплавленного в единицу времени металла, но и скоростью нанесения его на поверхность изделия. Высокопроизводительный способ дуговой наплавки колеблющимся электродом позволяет за один проход обеспечить тонкий (2-3 мм) и широкий (20-80 мм) наплавленный слой с небольшим проплавлением ( $\gamma_0 = 25-30 \%$ ) и минимальным термическим воздействием на основной металл. Особенно эффективна такая технология при наплавке цилиндров малого диаметра, обладающих ограниченным теплонасыщением.

Наиболее применим в промышленности способ, при котором электрод совершает одновременно и поступательное и поперечное перемещение (рис. 3.1.), что позволяет производить наплавку преимущественно в «общую» сварочную ванну небольшой длины (6-10 мм) с шириной, близкой к размаху колебаний. Для качественного формирования наплавленного ме-

талла производят задержку вращения изделия в начале процесса наплавки, что обеспечивает подогрев основного металла и создает необходимые теплофизические условия для существования широкой сварочной ванны. Время задержки вращения определяет по критерию Фурье:

$$t_3 = F_0 \frac{R^2}{a}, \quad (0.1)$$

где  $t_3$  – время задержки, с;  $R$  – радиус цилиндра, см;  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{см}^2/\text{с}$ ;  $F_0$  – критерий Фурье для стадии подогрева цилиндра по радиусу (для стали  $F_0 = 0,057$ ).

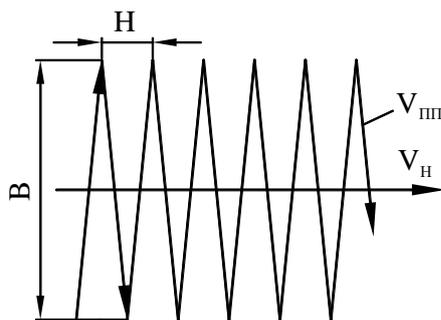


Рис. 3.1. Схема наплавки колеблющимся электродом:  $B$  – размах колебаний (ширина валика);  $H$  – шаг наплавки;  $V_n$  – скорость наплавки;  $V_{шп}$  – скорость поперечных колебаний электрода.

Наплавка колеблющимся электродом характеризуется большим количеством независимых параметров, то есть является гибким способом, что позволяет в ряде случаев не применять предварительный подогрев. Этот процесс позволяет в широких пределах регулировать глубину проплавления за счет изменения соотношения между скоростью наплавки и скоростью поперечных перемещений электрода, а также за счет наплавки на прямой и обратной полярности.

Перемещения дуги по поверхности сварочной ванны улучшают стойкость наплавленного металла против образования горячих трещин за счет улучшения условий его кристаллизации при повторных нагревах и перемешивании расплава.

Основные параметры режима наплавки под флюсом цилиндрических тел определяется из следующих соотношений:

$$\frac{V_p}{q} = A3 \quad 2- B 6,3), i \quad (3.2)$$

$$V_p = \sqrt{V_{шп}^2 + V_n^2}, \quad (3.3)$$

$$K = \frac{I}{D^{0,37}}, \quad (3.4)$$

$$V_{шп} = 0,68BD, \quad (3.5)$$

где  $V_H$  – скорость наплавки, м/ч;  $V_{\text{пп}}$  – скорость поперечных перемещений электрода, м/ч;  $V_p$  – результирующая скорость конца электрода, м/ч;  $D$  – диаметр изделия, мм;  $B$  – ширина наплавленного слоя, мм;  $K$  – коэффициент, учитывающий крутизну поверхности;  $q$  – эффективная тепловая мощность дуги, кал/с;  $A$  – коэффициент, учитывающий свойства наплавочных материалов ( $A = 0,8-1,2$ ).

Уточнить выбранные параметры режима и оптимизировать процесс наплавки можно как по данным , так и с помощью критериальной оценки

$$K_T = \frac{q}{c\gamma R^2 B T_{\text{пл}}}, \frac{1}{n} \frac{V_{\text{пп}}}{V_H} \quad (3.6)$$

где  $K_T$  – безразмерный критерий технологического подобия процессов наплавки;  $T_{\text{пл}}$  – температура плавления основного металла;  $B$  – ширина наплавленного слоя;  $V_{\text{пп}}$  – скорость поперечного перемещения электрода;  $n$  – количество оборотов цилиндра в единицу времени;  $R$  – радиус изделия.

Критерий технологического подобия  $K_T$  (ф. 3.6) связывает теплофизические параметры режима. По физическому смыслу он представляет величину, пропорциональную отношению введенной в цилиндр теплоты за время наплавки к теплосодержанию цилиндра высотой равной размаху колебаний при температуре плавления и соотношению скорости поперечного перемещения электрода с линейной скоростью наплавки. Условием теплового подобия является постоянство значений критерия  $K_T$ .

## 4. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ УСТАНОВКИ

### 4.1. Назначение и технические данные установки У-653

Универсальная наплавочная установка У-653 предназначена для упрочнения и восстановления электродуговой наплавкой под флюсом и в защитных газах наружных и внутренних цилиндрических и конических поверхностей; возможна наплавка плоских поверхностей.

Габариты наплавляемых изделий:

Диаметр, мм	20-800
Длина, мм	до 1200
Ширина плоских изделий, мм	до 400
Масса, кг	до 200

Характеристика наплавочного автомата А-1406	
Скорость подачи проволоки, м/ч	50-500
Сила сварочного тока, А	до 1000
Диаметры электродных проволок, мм	2-5
Наклон электрода, град	(+/-)30
Смещение электрода от зенита, мм	(+/-)50
Амплитуда колебаний электрода (плавная регулировка), мм	15-70
Скорость колебаний электрода (ступенчатая регулировка), м/ч	80-200
Перемещение автомата:	
вдоль оси станка, мм	1300
скорость рабочая (ступенчатая регулировка), м/ч	0,5-150
скорость маршевая, м/мин	2
вертикальное, мм	(+/-) 250
Шаг при спиральной наплавке (ступенчатая регулировка), мм	3-20
Число оборотов шпинделя манипулятора (ступенчатая регулировка), об/мин	0,03-10
Угол поворота шпинделя манипулятора От горизонтальной оси, град	(+/-)360
Масса установки, кг	1900

Установка комплектуется наплавочным автоматом А-1406, станком, обеспечивающим передвижение автомата и вращение детали, и источником питания ВДУ-504.

#### 4.2. Конструкция установки У-653 и назначение ее узлов

Наплавочный автомат А-1406 установлен на станке (рис. 4.1), состоящем из станины тумбы и стойки. В стойке и тумбе расположено электрооборудование. На тумбе установлена коробка скоростей, манипулятор и коробка передач. Манипулятор снабжен цилиндром для крепления изделий. На станине расположены верхняя и нижняя направляющие, по которым перемещается каретка. На каретке сверху установлен наплавочный автомат, а снизу – флюсоприемник. Каретка имеет рабочую (наплавка по спирали и линейная) и маршевую скорость перемещения. Первая обеспечивается ходовым винтом, вращаемым от коробки подач, а вторая – от привода маршевого перемещения. С обратной стороны станины установлены два конечных выключателя, ограничивающие крайние положения каретки.

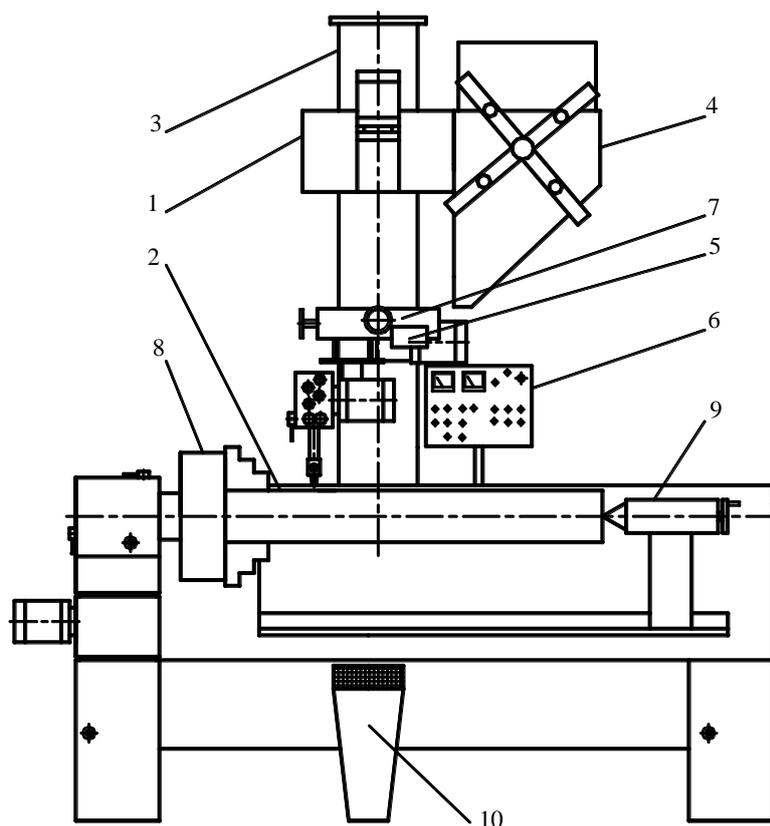


Рис. 4.1 Схема наплавочной установки У-653: 1 – автомат А-1406; 2 – станок; 3 – штанга; 4 – бункер для флюса; 5 – колебатель; 6 – пульт управления; 7 – суппорт; 8 – манипулятор; 9 – пиноль; 10 – флюсоприемник.

Задняя бабка на станине укреплена консольно, перемещается вручную и закрепляется прижимом. Поджим изделий осуществляется пинолью, имеющей пружинный тепловой компенсатор.

Автомат А-1406 состоит из механизма вертикального перемещения штанги, суппорта, механизма колебаний электрода, подающего механизма флюсоаппарата и набора мундштуков и приставок для различных способов наплавки, а также штанги с механизмом вертикального перемещения, обеспечивающего подъем и опускание наплавочной головки.

Суппорт предназначен для корректировки, с помощью ручного привода, положения мундштука (смещение с зенита).

Бункер для флюса имеет сыпной патрубок с шибером для подсыпки флюса, сбоку бункера находится лоток. Флюсоаппарат предназначен для уборки не расплавившегося флюса, разряжение в камере создается сжатым воздухом при помощи эжектора.

Механизм колебания электрода состоит из редуктора со сменными шестернями, каретки и электродвигателя. Изменение направления движения каретки осуществляется реверсированием электродвигателя с помощью микровыключателей, на которые воздействуют установленные на ва-

лу реечного колеса упоры. Раздвигая упоры, устанавливают необходимый размах колебаний.

Механизм подачи электрода состоит из электродвигателя постоянного тока и редуктора со сменными шестернями. Скорость вращения электродвигателя плавно регулируется в десятикратном диапазоне с помощью тиристорного привода и находящегося на пульте управления резистора. Ступенчато изменить скорость подачи проволоки можно в двух диапазонах (поменять местами шестерни), при этом в каждом диапазоне обеспечивается плавное регулирование, м/ч: 13-133 и 53-532.

Правильно-прижимной механизм служит для рихтовки и прижима проволоки к ведущему ролику. Он состоит из четырех установленных в эксцентриковых осях роликов, один из них – прижимной. При заправке проволоки подпружиненный прижимной ролик отводится в сторону.

Пульт управления расположен на каретке. На него выведено управление всеми электродвигателями, находящимися на станке и автомате, там же находятся приборы, контролирующие процесс наплавки.

#### 4.3. Работа электрической схемы установки

Для работы электрооборудования установки У-653 (принципиальная электрическая схема представлена на рис. 4.2) необходимо установить следующие наладочные величины:

Наладка тиристорного привода электродвигателя подачи проволоки М1 осуществляется настройкой фазосдвигающей цепи. Скорость вращения якоря двигателя должна плавно регулироваться потенциометром.

Р 3. Включение и выключение подачи электрода производится кнопками S BC 3 (вверх) и S BC 4 (вниз).

Двигатель вертикального перемещения автомата включается кнопками S BC5 (вверх) и S BC6 (вниз). Ход штанги ограничивается конечными выключателями SQ и SQ1.

Двигатель маршевого перемещения каретки М4 включается кнопкой S BC2 (влево) или S BC12 (вправо), выключается кнопкой S BC13 (стоп).

Двигатель вращателя и рабочего перемещения каретки М5 включается кнопками SBC8 (влево) и SBC9 (вправо) при положении переключателя SA2 – «Наладка». Останавливается М5 нажатием кнопки SBC10 (стоп). Перемещение каретки ограничено конечными выключателями SQ5 и SQ6.

Двигатель колебателя включается тумблером SA1 и кнопкой SBC7 («наладка»).

Двигатель манипулятора включается кнопками SBC14 и S BC15.

Сварочное напряжение регулируется резистором R8, расположенным на пульте управления.

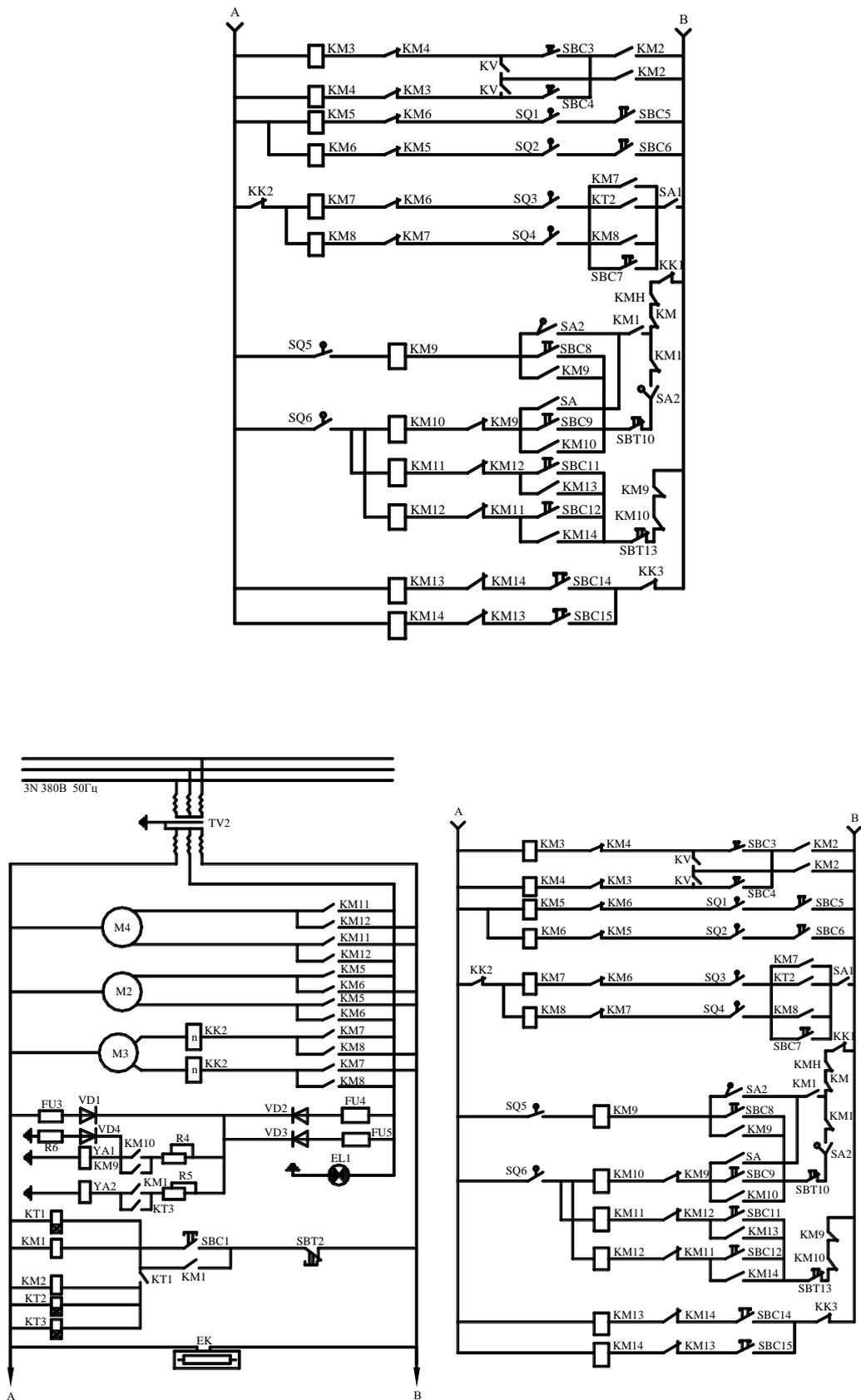


Рис. 4.2. Принципиальная электрическая схема установки У-653

1. Напряжение 24 В на катушках электромагнитной муфты YA1 Резистором R4, отсекающего газа YA2 резистором R5 и реле напряжения KV;
2. Реле времени KT1, KT2, KT3 настроить на выдержку соответственно 3-4 с, 1-2 с, 7-8 с.

Перед началом наплавки необходимо:

- 1) Переключателем SA2 выбрать направление перемещения автомата;
- 2) При работе с колебателем включить тумблер SA1;
- 3) Включить автоматический выключатель QF (на станке);
- 4) Включить источник сварочного тока;
- 5) Включить кнопку SBC17 «Пуск схемы».

Пуск наплавки осуществляется кнопкой SBC1. Срабатывают реле KT1 и KM1, одним контактом KM1 становится на блокировку, двумя другими включает отсекающий газ YA2 и цепь управления двигателем рабочего перемещения каретки, включая реле KM9 или KM10, которые своими контактами включают муфту YA1 и двигатель вращателя и рабочего перемещения каретки M5.

С выдержкой 3-4 с, необходимой для натекания защитного газа, реле KT1 включает реле KM2, KT2 и KT3. Контакты реле KM2 и KT2 включают катушку магнитного пускателя, встроенного в источник сварочного тока, и подается сварочное напряжение. Замыкается цепь автоматического управления двигателем подачи электрода M1, срабатывает KM4 и электрод подается вниз до тех пор, пока не замкнется на изделии. После этого отключается реле напряжения KV и своим контактом включает реле KM3 – электрод поднимается вверх и возбуждается дуга. Затем, как установится сварочное напряжение и вновь включится KV, электрод снова подается вниз с заданной скоростью и начинается процесс наплавки.

Если SA1 установлен в положении «ВКЛ», то включается схема колебателя через реле KT2. В зависимости от положения, в котором находится колебатель, замкнут или SQ3 или SQ4, соответственно включено реле KM7 или KM8, их контакты включают двигатель колебателя M3.

Для прекращения наплавки следует нажать кнопку SBT2 «стоп», при этом реле KM1 отключает цепь управления двигателем рабочего перемещения каретки, реле KM9 и KM10 отключают электромагнитную муфту YA1 и двигатель M5 – каретка останавливается.

Реле KM2 отключает реле KM4, которое отключает двигатель M1 и подача электрода прекращается, но дуга горит до естественного обрыва.

С выдержкой 1-2 с. Реле KT2 размыкает свой контакт в цепи магнитного пускателя источника сварочного тока, отключается сварочное напряжение.

С выдержкой 7-8 с. Реле KT3 размыкает свой контакт в цепи питания отсекающего газа YA2 и подача газа прекращается.

Аварийно отключить схему можно нажав кнопку SBC16 («стоп аварийно») или выключив автоматический выключатель QF.

#### 4.4. Настройка станка на различные способы наплавки

Для наплавки цилиндров по винтовой линии необходимо:

1) рукоятку переключения коробки подач установить в положение «Наплавка по спирали»;

2) установить требуемую скорость вращения шпинделя  $n$  по номограмме, расположенной на коробке скоростей. Зная диаметр изделия и линейную скорость наплавки по номограмме определяют необходимую скорость вращения шпинделя (эти значения вынесены на периметр рисунка). Там же дано соотношение сменных шестерен, которые необходимо установить на коробке скоростей, и положение рычагов переключения ступеней коробки. Если скорости наплавки и диаметры изделий точно не соответствуют значениям, данным в номограмме, то  $n$  можно вычислить по формуле:

$$n = \frac{V_n}{0,19D}, \quad (0.2)$$

где  $n$  – количество оборотов шпинделя, об/мин;  $V_n$  – скорость подачи проволоки, м/ч;  $D$  – диаметр изделия, мм.

3) рукояткой реверса задать необходимое направление вращения манипулятора;

4) установить величину шага наплавки сменными шестернями в коробке подач, значение шага наплавки выбирают по таблице.

Для линейной наплавки вдоль оси станка необходимо:

1) рукоятку переключения коробки подач установить в положение «Линейная наплавка»;

2) отключить шпиндель станка, установив рукоятку реверса в среднее положение;

3) установить требуемую величину скорости линейного перемещения автомата сменными шестернями коробки скоростей.

При наплавке колеблющимся электродом необходимо:

1) рукоятку коробки подач перевести в среднее положение;

2) установить требуемую скорость вращения шпинделя (как при наплавке по винтовой линии)

3) рукояткой реверса шпинделя задать направление его вращения;

4) установить на колебателе размах и скорость поперечных перемещений электрода;

5) установить механизм колебаний в среднее положение, а мундштук – в центр наплавляемого валика и сместить электрод с зенита детали в сторону, противоположную направлению ее вращения.

## 5. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

### 5.1. Оборудование и материалы

- 1) наплавочная установка У-653;
- 2) цилиндрическое стальное изделие заданного диаметра;
- 3) наплавочная сплошная и порошковая проволока;
- 4) сварочные флюсы АН-20С, АН-26;
- 5) секундомер;
- 6) весы;
- 7) зубило, молоток, ножницы.

### 5.2. Последовательность выполнения работы

1. Изучить методические указания и получить допуск на выполнение работы (контролируются знания: процесса дуговой наплавки колеблющимся электродом, устройство и назначение узлов установки У-653 и работа ее электрической схемы).

2. Подготовить установку к работе, установить изделие, подготовить наплавочные материалы, и опробовать взаимодействие узлов установки в холостом режиме.

3. По заданному диаметру изделия, ширине наплавляемого слоя, диаметру электрода рассчитать основные параметры режима наплавки и наплавить экспериментальные валики, изменяя скорость поперечных перемещений электрода, напряжение на дуге, вылет электрода и сварочный ток, результаты экспериментов внести в таблицу.

4. По результатам трех-пяти опытов оценить качество наплавленного слоя и обосновать оптимальный режим наплавки.

5. Описать эксперимент, оценив влияние параметров режима на качество наплавленного слоя и отделимости шлака, сделать выводы по работе.

### Результаты экспериментальных исследований

Таблица

Диаметр изделия	Ширина напл. слоя	Диаметр электрода и марка	Марка флюса	Вылет электрода	Напряжение на дуге	Сварочный ток	Скорость поперечного перемещения электрода	Смещение электрода	Качество наплавленного металла и отделимость шлака
мм	мм	мм	-	мм	В	А	м/ч	мм	

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по работе оформляется в соответствии с установленными требованиями и должен содержать:

- 1) цель и задачи работы;
- 2) таблицу с экспериментальными данными;
- 3) схему наплавки с указанием параметров режима;
- 4) выводы по работе с обоснованием выбора рационального режима наплавки и описанием влияния его основных параметров на качество наплавленного металла и отделимость шлака.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключаются преимущества широкослойной наплавки колеблющимся электродом в сравнении с процессом наплавки цилиндров по винтовой траектории?
2. Как влияет частота и скорость поперечных перемещений электрода на производительность процесса и качество наплавленного металла?
3. Почему при наплавке колеблющимся электродом можно в 2-2,5 раза, в сравнении с нормальным значением увеличивать вылет электрода и какое это дает преимущество?
4. Какие типы колебателей применяются для широкослойной дуговой наплавки проволочным электродом?
5. Какие технологические приемы позволяют быстро получить «общую» сварочную ванну?
6. Почему при наплавке колеблющимся электродом существенно уменьшается проплавление основного металла?
7. В чем заключаются недостатки наплавки колеблющимся электродом, как они влияют на качество наплавленного металла и какие меры позволяют уменьшить технологические дефекты?
8. Как предотвратить увеличенное проплавление по краям широкого наплавленного валика?
9. Можно ли при наплавке колеблющимся электродом увеличить, в сравнении с номинальным значением, в 1,5-2 раза сварочный ток, не получив при этом большего проплавления основного металла?
10. На что и как влияет изменение напряжения на дуге при наплавке колеблющимся электродом?
11. Какие конструкторские недоработки Вы видите в установке У-653 и как можно ее усовершенствовать?
12. В чем заключается методика расчета основных параметров режима широкослойной наплавки колеблющимся электродом цилиндрических изделий?

## 8. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Широкойслоная наплавка под керамическим флюсом цилиндрических деталей Кушнеров Д. М., Рыжей С. Ф., Лапченко В. А. и др. / Автоматическая сварка. – 1974. – № 12. – С. 48-50.

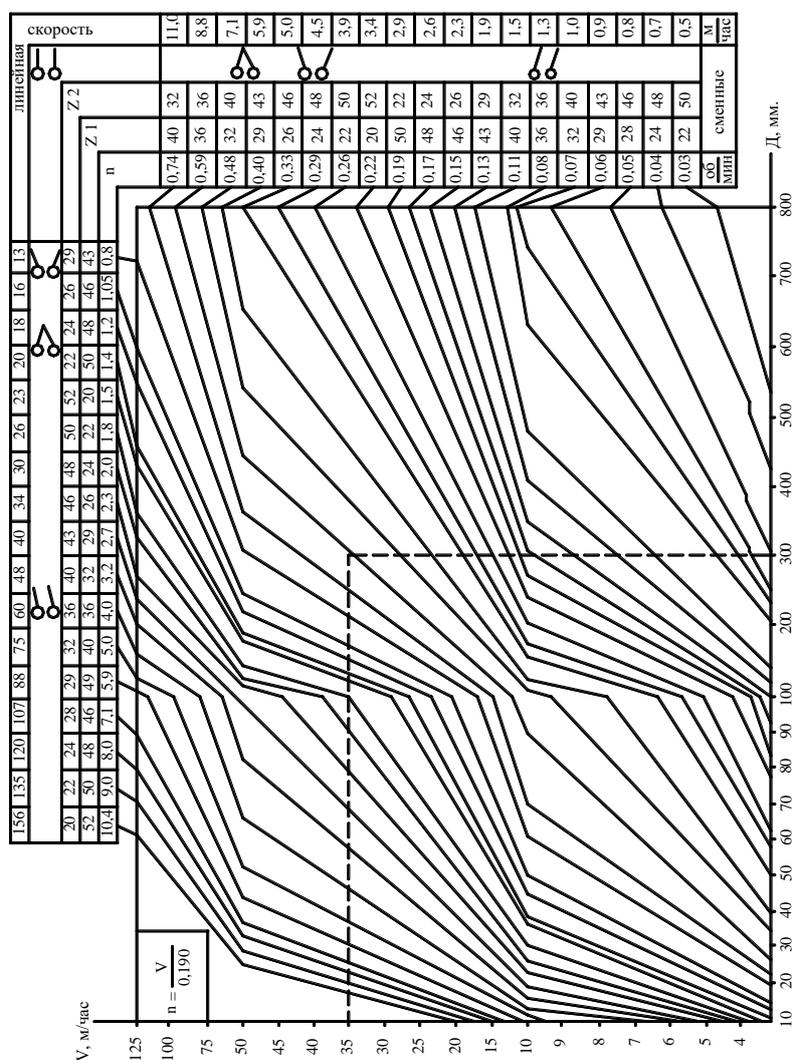
2. Мозок В. М., Юзвенко Ю. А. Синхронный колебатель для широко-слоной наплавки / Информационное письмо № 47. Киев.: ИЭС им. Патона НАН Украины. – 1974. – 4 с.

3. Штрикман А. П., Денисов Б. С. Определение и регулирование параметров режима наплавки с поперечными колебаниями плавящегося электрода. Сварочное производство. – 1974. – № 12. – С. 26-28.

4. Оптимизация процесса дуговой ширококойслоной наплавки поверхностей цилиндров малых диаметров / Пахолук А. П., Юзвенко Ю. А., Кирилюк Г. А. и др. Автоматическая сварка. – 1980. – № 6. – С. 49-57.

### Приложение

Номограмма для определения количества зубьев сменных шестерен



## **4. Исследование технологических особенностей электрошлаковой наплавки проволочным электродом на установке А-1401**

### **1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Изучить особенности процесса электрошлаковой наплавки проволочным электродом в охлаждаемом кристаллизаторе. Изучить конструкцию наплавочной установки А-1401 и научиться экспериментально оценивать влияние параметров режима наплавки на устойчивость процесса и формирование наплавленного металла.

### **2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

2.1. Изучить особенности процесса электрошлаковой наплавки проволочным электродом.

2.2. Изучить конструкцию, технические данные наплавочной установки А-1401 и ее принципиальную электрическую схему.

2.3. Подготовить наплавочный автомат к работе и опробовать взаимодействие его узлов в холостом режиме.

2.4. Экспериментально оценить влияние параметров режима наплавки на устойчивость процесса и формирование наплавленного металла.

2.5. Обработать экспериментальные результаты и обосновать оптимальный режим наплавки, сделать выводы по работе.

### **3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКИ ПРОВОЛОЧНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ**

Гибкий и эффективный процесс электрошлаковой наплавки (ЭШН) в охлаждаемом кристаллизаторе удачно сочетает два основных фактора, необходимых для получения наплавленного металла высокого качества: возможность получения ориентированной кристаллизации и рафинирование металла при взаимодействии его с перегретым шлаком. Наиболее полно эти процессы реализуются с применением проволочного электрода (рис. 3.1).

Основными параметрами режима ЭШН проволочным электродом являются: род и полярность сварочного тока, напряжение между электродом и металлической ванной, диаметр, скорость подачи, "сухой" вылет электрода и глубина его погружения в шлаковую ванну, глубина шлаковой и металлической ванны, химический состав флюса материалы.

Наиболее важное требование, предъявляемое к ЭШН, – это обеспечение устойчивого процесса. На устойчивость ЭШН оказывают влияние в разной степени все параметры режима и физические свойства электродного металла и шлака.

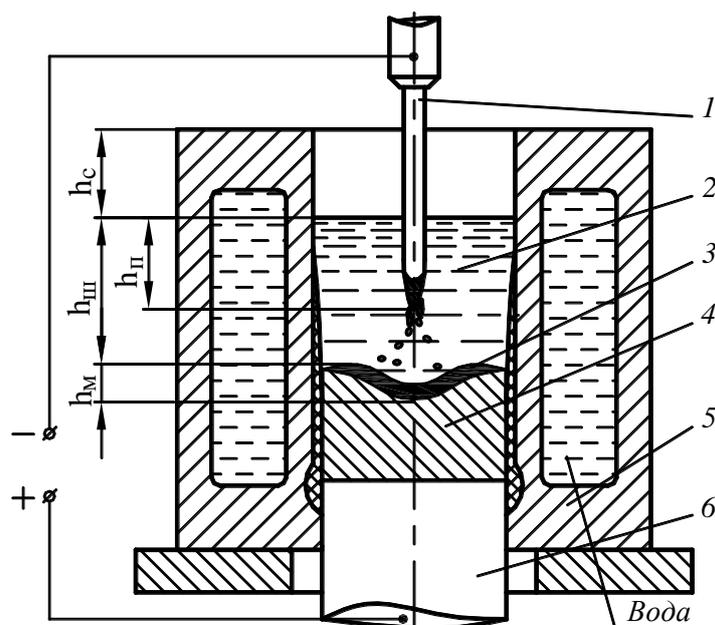


Рис.3.1 Схема ЭШН проволочным электродом: 1 – электрод; 2 – шлаковая ванна; 3 – металлическая ванна; 4 – наплавленный металл; 5 – кристаллизатор; 6 – изделие;  $h_c$  – "сухой" вылет электрода;  $h_п$  – глубина погружения электрода в шлак;  $h_ш$  – глубина шлаковой ванны;  $h_м$  – глубина металлической ванны.

Различают несколько видов нарушения электрошлакового процесса (рис. 3.2):

1) возникновение дуги между электродом и шлаковой ванной в следствие превышения напряжения между электродом и металлической ванной над падением напряжения на шлаковой ванне на величину, большую номинального напряжения на дуге между электродом и шлаковой ванной (дуга первого типа);

2) возникновение дуги между плавящимся электродом и металлической ванной, когда напряжение между ними настолько мало, что скорость подачи электрода превышает скорость его плавления (дуга второго типа);

3) выброс шлаковой ванны в результате перегрева и испарения значительной ее части.

Значения предельного напряжения между электродом и металлической ванной ( $U_{эм}$ ), вызывающего дуги первого и второго типа, являются естественными верхней и нижней границами электрошлакового процесса. С повышением электропроводности и стабилизирующих свойств шлака предельные значения  $U_{эм}$  снижаются, а с увеличением диаметра электродов обе границы процессы смещаются вверх (рис. 3.2). Рост тока способствует расширению интервалов каждой из границ в сторону увеличения напряжения.

Основные параметры режима наплавки и физические свойства шлака связаны зависимостью:

$$U = I \frac{1}{2\pi\chi h_n} \ln \frac{4h_n}{d_э}, \quad (3.1)$$

где  $U$  – напряжение между электродом и металлической ванной;  $I$  – сварочный ток;  $\chi$  – удельное электросопротивление шлака;  $d_э$  – диаметр электрода;  $h_n$  – глубина погружения электрода в шлак.

Большое влияние на сварочный ток оказывает скорость встречи электрода со шлаковой ванной ( $V_{вст}$ ), (она же скорость плавления электрода) и площадь его поперечного сечения. Для расчетов пользуются линейной зависимостью.

$$j = kV_{вст}, \quad (3.2)$$

где  $j$  – плотность сварочного тока;  $V_{вст}$  – скорость встречи электрода со шлаковой ванной;  $k$  – коэффициент, учитывающий физические свойства шлака.

Совместное решение уравнений 3.1 и 3.2 дает уравнения границ области устойчивых режимов ЭШН:

$$U_{нижн} = V_{встн} \cdot F_{эл} \frac{k}{2\pi\chi} \cdot \frac{\ln \frac{4(h_n - a)}{d_{эл}}}{h_{ш} - a}, \quad (3.3)$$

$$U_{верх} = V_{вств} \cdot F_{эл} \frac{k}{2\pi\chi} \cdot \frac{\ln \frac{4h_{пкр}}{d_{эл}}}{h_{пкр}}, \quad (3.4)$$

где  $U_{нижн}$ ,  $U_{верх}$ ,  $V_{встн}$ ,  $V_{вств}$ ,  $h_{пкр}$  – критические значения верхнего и нижнего пределов напряжений, скоростей встречи и глубины погружения электрода;  $F_{эл}$  – площадь поперечного сечения электрода, мм<sup>2</sup>;  $d_{эл}$  – диаметр электрода, мм;  $\chi$  – удельное электросопротивление шлака;  $k$  – коэффициент, учитывающий физические свойства шлака;  $h_{ш}$  – глубина шлаковой ванны, мм;  $h_n$  – глубина погружения электрода в шлак, мм;  $a = (h_{ш} - h_n)$  – расстояние от торца электрода до металлической ванны, мм.

Уравнения 3.3 и 3.4 можно использовать для расчета параметров режима ЭШН.

При ЭШН наблюдается примерное равенство подводимой и отводимой теплоты с единицы поверхности фронта кристаллизации в единицу времени. Это определяет постоянство формы и скорости перемещения фронта кристаллизации (существует двухфазная область) и равномерное его перемещение, что влияет на последовательный характер кристаллизации. Определить среднюю линейную скорость кристаллизации наплавленного металла при сварке и наплавке в любой точке фронта кристаллизации можно по уравнению:

$$V_k = V_c \cdot \cos \alpha, \quad (3.5)$$

где  $V_k$  – скорость кристаллизации наплавленного металла;  $V_c$  – скорость перемещения источника тепла или любой точки фронта кристаллизации в направлении перемещения источника;  $\alpha$  – угол между направлением перемещения источника тепла и роста кристаллита в рассматриваемой точке фронта кристаллизации.

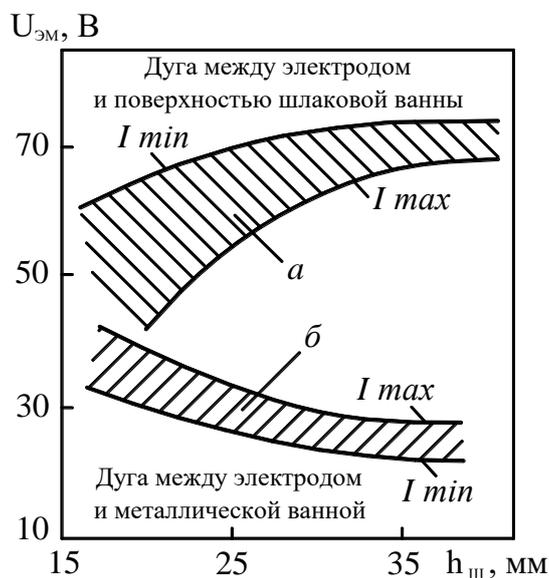


Рис. 3.2 Область устойчивого электрошлакового процесса, а также дуг первого и второго типов в зависимости от соотношения глубины шлаковой ванны  $h_{ш}$ , тока  $I$  и напряжения  $U_{эм}$ ;  $I_{min}$  и  $I_{max}$  – предельные значения сварочного тока для верхней (а) и нижней (б) границ режима ЭШН.

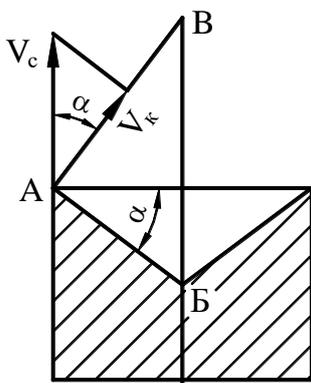


Рис. 3.3 Схема кристаллизации наплавленного металла при ЭШН

При образовании кристаллита в точке  $A$  (рис. 3.3) его главная ось будет ориентирована перпендикулярно изотерме ванны в направлении точки  $B$ . Средняя линейная скорость кристаллизации устанавливается по длине пути кристаллита за время его роста, определяемого перемещением в точку  $B$  нижней точки ванны  $B$ . Если форма фронта кристаллизации криволинейна, то  $V_k$  и  $\alpha$  в каждой точке будут различны. На характер кристаллиза-

ции и форму ее фронта, определяемую формой металлической ванны, сильно влияют основные параметры режима ЭШН. Чем больше глубина шлаковой ванны, тем больше тепла расходуется на поддержание ее в расплавленном состоянии и тем меньше тепла идет на поддержание металлической ванны. Поэтому с увеличением глубины шлаковой ванны глубина металлической ванны уменьшается, что способствует осевой направленности кристаллитов. Но при мелкой металлической ванне условия ее рафинирования ухудшаются.

Увеличение скорости подачи электрода и, соответственно, величины тока сопровождается погружением электрода в шлак. При этом зона тепловыделения становится более концентрированной, источник нагрева перемещается вниз, увеличиваются объем и глубина металлической ванны. Повышение напряжения и сопровождающее его изменение характера выделения тепла в шлаке приводят к уменьшению глубины металлической ванны при сохранении объема за счет увеличения ее ширины. Чрезмерное напряжение вызывает вскипание шлака и выплески. Прогиб металлической ванны и его величина обусловлены действием струи шлака, направленной от электрода к поверхности ванны.

Направление и интенсивность струи шлака определяется геометрией пространственного растекания тока независимо от его рода, так как возникающая электромагнитная сила пропорциональна квадрату сварочного тока. Управлять гидродинамическими процессами в сварочной ванне можно применяя различные технологические приемы: колебания электрода, многоэлектродную наплавку, создавая внешнее магнитное поле и т. д.

Важное влияние на процесс ЭШН оказывает тепловыделение в шлаковой ванне. Установлено, что тепло преимущественно выделяется в ограниченном 3...4 диаметрами электрода объеме шлака. Температура в таком тепловом центре достигает 1900...2300 °С, а в приграничной с ним зоне она снижается до 1600...1700 °С. На границах шлак-металл, шлак – формирующее устройство температурный градиент на уровне торца электрода составляет 40...120 °С/мм. При разработке режима наплавки необходимо учитывать локальное выделение тепла и применять технологические приемы для перераспределения тепловой мощности в шлаковой ванне (перемешивание шлака, вибрация электрода, введение дополнительной металлической присадки и т.д.).

#### 4. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ УСТАНОВКИ

##### 4.1. Назначение и технические данные установки А-1401

Наплавочная установка состоит из сварочного автомата А-1401 У4 типа АСП-10Ф и источника питания – сварочного выпрямителя ВДУ-1001. Сварочный автомат предназначен для электродуговой наплавки и сварки

под флюсом (может использоваться для ЭШН) плавящимся электродом с независимой от напряжения на дуге скоростью его подача.

Напряжение питающей сети трехфазного тока, В	380
Частота питающей сета, Гц	50
Номинальный сварочный ток при ПР=100%,А	до 1000
Количество электродов, шт.	1
Диаметр электродной проволоки, мм	2-5
Скорость подача электрода, м/ч	13-133 53-532
Регулировка скорости подача электрода	плавная
Скорость сварки, м/ч	12-120
Регулировка скорости сварки	плавная
Маршевая скорость, м/ч	950
Вертикальное перемещение сварочной головки:	
ход, мм	250
скорость. м/мин	0,43
Поперечное перемещение сварочной головки:	
ход, мм	±55
скорость	ручной привод
Регулировка угла наклона электрода к вертикали, град	±45 ручная
флюсоаппаратура:	
емкость, дм <sup>3</sup>	55
расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч	30
давление воздуха в питающей магистрали, МПа	50
высота всасывания флюса, м	не более 2

#### 4.2. Конструкция автомата А-1401 и назначение его узлов

Наплавочный автомат А-1401 состоит (рис. 4.1) из:

1) тележки, предназначенной для перемещения автомата вдоль наплавляемой поверхности со скоростью наплавки и в маршевом режиме. Тележка представляет собой редуктор в сварном корпусе с двумя колесами, одно из которых ведущее. Привод маршевого перемещения состоит из асинхронного электродвигателя, червячной пары и электромагнитной муфты. Привод рабочего перемещения состоит из электродвигателя постоянного тока, редуктора и электромагнитной муфты. Скорость наплавки регулируется плавно за счет изменения скорости вращения электродвигателя. На тележке установлены конечные выключатели, отключающие привод в заданных положениях. Ведущее колесо связано с самотормозящейся ки-

нематической цепью тележки посредством фрикционного диска. Для перемещения тележки вручную диск отпускается с помощью винта;

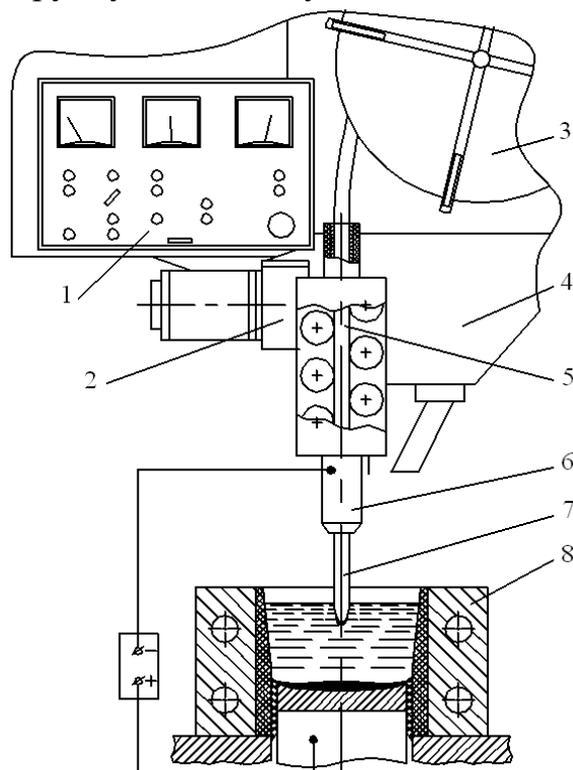


Рис 4.1. Схема наплавки с применением автомата А-1401: 1 – пульт управления; 2 – механизм подачи проволоки; 3 – катушка с проволокой; 4 – бункер с флюсом; 5 – правильно-прижимного механизма; 6 – токоподводящий мундштук; 7 – проволока; 8 – кристаллизатор.

2) стойки, крепящейся к верхней плоскости тележки и предназначенной для предохранения автомата от опрокидывания (состоит из двух сварных кронштейнов и ролика);

3) механизма вертикального перемещения, служащего для регулирования положения автомата по высоте в зависимости от требуемого вылета электрода и размещения наплавляемого изделия; он состоит из подвески, крепящейся через изолирующую прокладку к тележке, редуктора в литом корпусе и асинхронного электродвигателя; клеммовое соединение подвески с редуктором механизма подъема позволяет поворачивать его на угол  $90^\circ$  относительно тележки; перемещение по вертикали ограничивается двумя конечными выключателями;

4) штанги, выполненной в виде трубы с ходовыми решетками механизма подъема автомата;

5) суппорта, предназначенного для поперечной корректировки положения мундштука;

6) механизма подачи электрода, состоящего из электродвигателя постоянного тока и редуктора со сменными шестернями, что позволяет как плавно, так и ступенчато регулировать скорость подачи электрода;

7) правильно-прижимного механизма, обеспечивающего рихтовку электродной проволоки и поджим ее к ведущему ролику механизма подачи;

8) мундштука, служащего для подхода тока к электроду;

9) флюсоаппарата, предназначенного для отбора нерасплавившегося флюса с места наплавки; разряжение во флюсоаппарате создается эжектором с помощью сжатого воздуха, сыпное отверстие в аппарате закрывается клапаном, связанным тягой с рукояткой;

10) бункера для флюса, на стенке которого крепится панель управления флюсоаппаратом, флюс подается через патрубков с шибером;

11) катушки для проволоки с четырьмя подпружиненными запорными колодками, зажимным винтом и тормозным устройством;

12) пульта управления с приборами для контроля сварочного тока, напряжения и скорости перемещения автомата, кнопками и резисторами управления сварочным процессом;

13) в шкафу управления автоматом размещены элементы электрической схемы.

#### 4.3. Работа электрической схемы автомата

Питание электрической схемы управления автоматом осуществляется от трехфазной сети переменного тока напряжением 380 В и частотой 50 Гц (рис. 4.2 а, б, в).

Защита схемы управления и электродвигателей осуществляется автоматическими выключателями.

Схема предусматривает плавное регулирование скорости подачи электрода и перемещения тележки.

В качестве регулирующего устройства в автомате применяется тиристорный привод, в схеме которого для изменения напряжения на обмотке возбуждения двигателя используется принцип фазового управления тиристорами, фазовый сдвиг сигнала на управляющих электродах тиристоров относительно анодного напряжения осуществляется при помощи фазосдвигающей цепи, состоящей из резистора, трансформатора и конденсатора.

Перед началом работы необходимо включить автоматические выключатели во всех блоках шкафа управления (QW2, QW3, QW4, QW5). После закрытия шкафа (при открытых дверях напряжение цепей управления отключено концевыми выключателями (SQ1 и SQ2) включить автоматический выключатель QW1 на его правой боковой стенке.

Маршевое перемещение автомата вперед или назад осуществляется двигателем М2, а рабочее – двигателем М1. Направление перемещения изменяется переключателями SA3 и SA4. Управление ведется кнопками SBC5 и SBC6 через реле 3KM1 и 3KM2 (маршевое), 2KM1 и 2KM2 (рабо-

чее). Остановка автомата осуществляется кнопкой SBC7, а аварийно – SBT2. Предусмотрено ограничение хода тележки в двух крайних положениях концевыми выключателями SQ3 и SQ4.

Подъем или отпуск сварочной головки автомата осуществляется двигателем привода штанги М3 при нажатии кнопок SBC8 или SBC9 и срабатывании соответственно реле 4KM1 или 4KM2. Перемещение штанги ограничено концевыми выключателями SQ5 и SQ6.

Опускание и подаем электрода осуществляется двигателем М4 при нажатии кнопок SBC10 (вверх) или SBC11 (вниз) и срабатывании соответственно реле 5KM1 и 5KM2.

Включается схема нажатием кнопки SVC1 (пуск схемы). При этом срабатывает реле 1KM и своими контактами подключает цепи двигателей М2 и М3 на напряжение 380 В, цепи управления на напряжение 127 В и шунтирует кнопку SVC1. На пульте управления загорается лампочка HL1. Если подана вода для охлаждения сварочных проводов, то срабатывает гидравлическое реле SQ0.

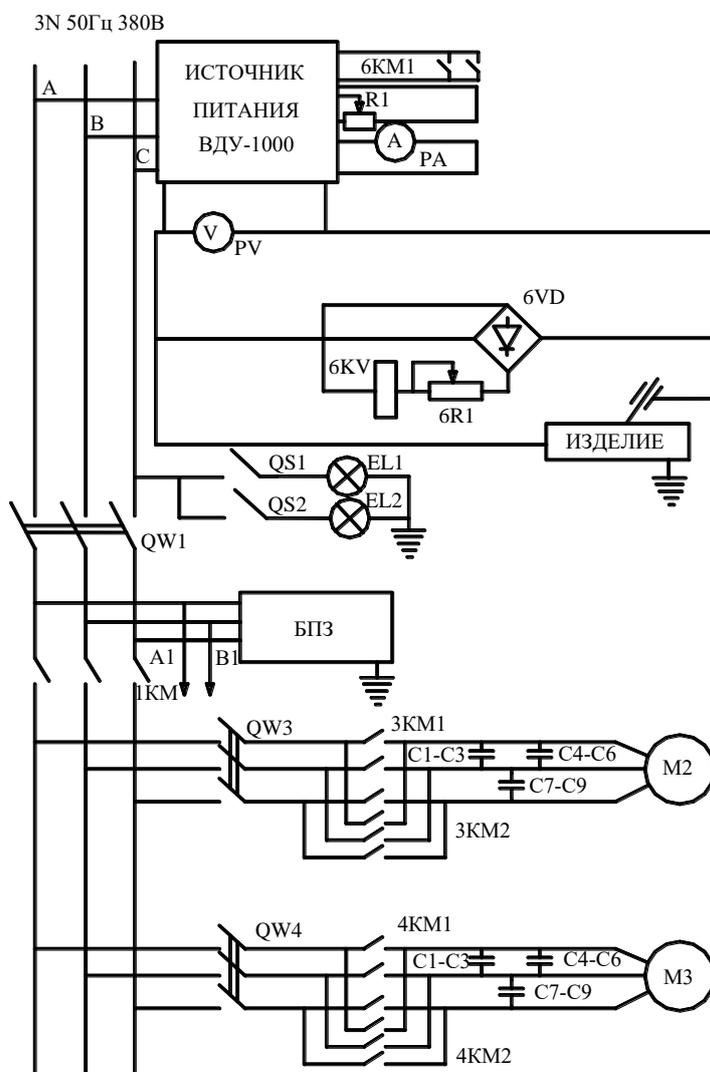
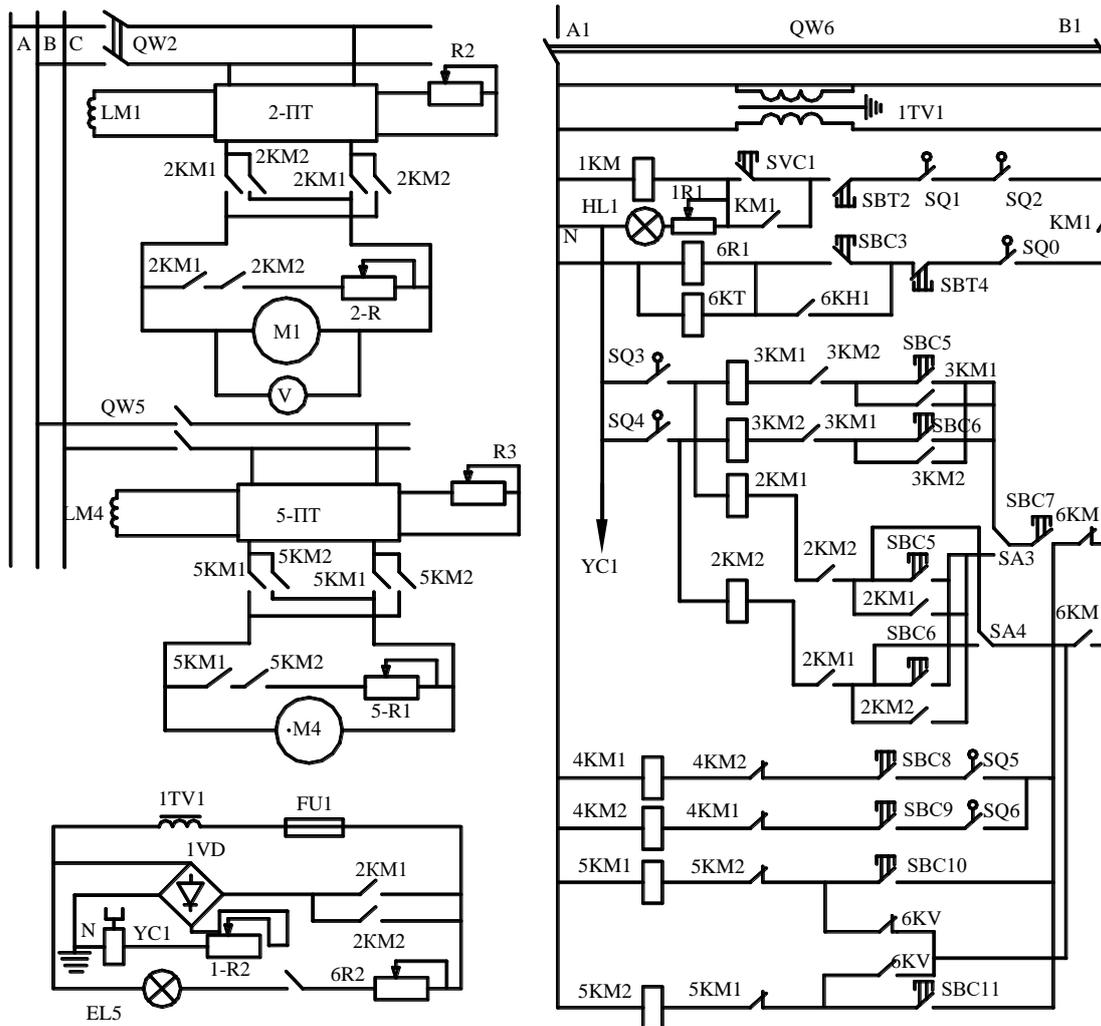


Рис 4.2. Принципиальная электрическая схема установки А-1401



Процесс сварки осуществляется нажатием кнопки SBC3. При этом сработает реле 6R1 и контактами 6KH1 включит источник сварочного тока и двигатель тележки на рабочую скорость через реле 2KM1 или 2KM2, а также двигатель подачи электрода вниз через реле 5KM2. До тех пор, пока электрод не коснется изделия, он подается вниз. При встрече электрода с изделием сработает реле напряжения 6KV и через реле 5KM1 реверсируется двигатель М4. Электрод поднимется вверх, возбуждается дуга. После того, как установится сварочное напряжение, снова сработает 6KV и электрод начнет подаваться вниз с заданной скоростью.

Регулирование напряжения на дуге ведется с пульта управления резистором R1. Скорость движения тележки и скорость подачи электрода регулируется резисторами R2 и R3 соответственно.

Скорость наплавки контролируется вольтметром.

Останавливает процесс наплавки нажатием кнопки SBT4 (стоп). При этом двигатели тележки и подачи электродной проволоки отключаются, а источник сварочного тока будет включен до тех пор, пока не сработает реле 6KT. Выдержка необходима для качественного завершения процесса наплавки.

## 5. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

### 5.1. Материалы и приспособления

- 1) кристаллизатор для ЭШН;
- 2) наплавочная сплошная и порошковая проволока;
- 3) сварочные флюсы АНФ-6, АН-20С, АН-60;
- 4) секундомер;
- 5) весы;
- 6) стальные образцы для наплавки.

### 5.2. Последовательность выполнения работы

1. Изучить методические указания и получить допуск на выполнение работы (контролируется знание процесса ЭШН, устройство и назначение узлов автомата и работа его электрической схемы).

2. Подготовить сварочные материалы, приспособление для наплавки, наплавочный автомат и опробовать его на холостой ходу.

3. На заданных преподавателем наплавочных материалах выполнить экспериментальные наплавки и оценить устойчивость процесса на разных режимах, скорость старта ЭШН, формирование наплавленного металла.

4. Полученные в результате эксперимента данные о параметрах процесса в таблицу 1.

Таблица 1

Параметры процесса ЭШН

№ п/п	Диаметр проволоки, мм	Сварочный ток, А	Напряжение на шлаке, В	Сухой вылет электрода, мм	Глубина шлаковой ванны, мм

5. Проанализировать результаты исследований (заполнить табл. 2), сделать выводы по работе.

Таблица 2

Оценка сварочно-технологических характеристик процесса ЭШН

№ п/п	Скорость старта ЭШН, с	Устойчивость режима ЭШН	Формирование наплавленного металла

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по работе оформляется в соответствии с установленными требованиями и должен содержать:

1. цель и задачи работы;
2. схему процесса ЭШН и таблицы экспериментальных данных и результатов исследования;
3. выводы по работе включающие обоснование влияния параметров режима наплавки на сварочно-технологические характеристики процесса.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается преимущества и недостатки процесса ЭШН проволочным электродом?
2. Какие технологические приемы позволяют получить относительно равномерное распределение температур в шлаке?
3. Как влияют сварочный ток и напряжение на форму металлической ванны?
4. Какая форма металлической ванны является оптимальной для получения качественного наплавленного металла?
5. Почему образуется шлаковая корка при ЭШН в кристаллизаторе, какие положительные и отрицательные, его функции?
6. От каких параметров зависит толщина шлаковой корки?
7. Как влияет на процессы при ЭШН глубина шлаковой ванны и химический состав шлака?
8. В чем заключается особенность ЭШН порошковыми проволоками?
9. Что такое верхний и нижний порог устойчивости ЭШН?
10. Какой технологический прием позволяет избежать усадочной раковины на поверхности наплавленного металла при ЭШН?
11. Какими способами можно осуществить старт ЭШН?
12. Каковы требования к флюсам для ЭШН?

## 8. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Электрошлаковая сварка и наплавка / Под ред. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1980. – 511 с.
2. Шаманин М.В. Средняя линейная скорость кристаллизации металла при сварке и переплавах / Судостроение, – 1970. – №13. – С .61-65.
3. Кох Б. А. К вопросу об устойчивости электрошлакового процесса / Труды ЛПИ им. Калинина, № 262. – Л.:ЛПИ, 1966, С. 57-62.
4. Самсонов И. Г., Королев Н. З., Бармин Л. Н. Температурный режим при электрошлаковой наплавке порошковой проволокой / Автоматическая сварка. – 1981. – № 1. – С. 34-38.

5. Определение диапазона устойчивого режима электрошлаковой сварки электродной проволокой / Д. А. Дудко, В. С. Сидорук // Автомат. Сварка. – 1978. – № 8. – С. 1-4.

## **5. Изучение методики расчета теплового режима электрошлаковой наплавки в токоподводящем кристаллизаторе**

### **1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Изучение функциональной взаимосвязи основных параметров режима электрошлаковой наплавки в токоподводящем кристаллизаторе и распределения тепловой мощности шлаковой ванны при подводе к ней тока через токоподводящую секцию кристаллизатора и полый неплавящийся электрод.

### **2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

2.1. Изучить влияние основных параметров режима ЭШН в токоподводящем кристаллизаторе на устойчивость процесса наплавки.

2.2. Изучить методику расчета теплового режима электрошлаковой наплавки в токоподводящем кристаллизаторе.

### **3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

Пространственное расположение торцевых поверхностей различных изделий (пуансоны, выталкиватели, оправки, прошивки, керны и др.) позволяет выгодно использовать для наплавки водоохлаждаемые кристаллизаторы. При подаче в шлаковую ванну электродных проволок, лент, металлических стержней, порошков при их плавлении образуется металлическая ванна, из которой кристаллизуется наплавленный металл и одновременно приобретает заданную геометрическую форму. Кристаллизаторы могут быть одно- и многосекционными, неподвижными или могут передвигаться со скоростью наплавки. Применение неплавящегося электрода не только облегчает управление процессом ЭШН, но и позволяет использовать в качестве наплавочных материалов порошки, дробь, жидкий металл, проволоки, прутки, стружку. Наиболее рационален способ ЭШН с неплавящимся электродом, функцию которого выполняет токоподводящая секция кристаллизатора.

Для ЭШН торцевых изделий (диаметром до 100 мм) рационален кристаллизатор, который содержит разъемные токоподводящую и формирующую секцию изолированные друг от друга (рис. 1). Конструкция токоподводящей секции предусматривает возможность изменения расположе-

ния токоподвода на ее поверхности, что в совокупности с принудительным электромагнитным воздействием на шлак обеспечивает его циркуляцию. Для предотвращения эрозии рабочей поверхности токоподводящей секции ее внутренняя полость защищена футеровкой, выполненной в виде сплошного графитового кольца. Циркуляция шлака позволяет выровнять температуру по его объему, что исключает локальные перегревы на границе шлак – неплавящийся электрод, сопровождающиеся возникновением микродуг, и предотвращает местный износ последнего.

Тепло, необходимое для осуществления процесса наплавки (поддержания заданной температуры шлака, нагрева и плавления присадочного материала), выделяется непосредственно в шлаковой ванне при прохождении через нее электрического тока. Для качественного процесса ЭШН при конкретном диаметре изделия необходим определенный объем шлака. В практике контролировать объем шлаковой ванны удобно через ее уровень, регистрируемый датчиком в токоподводящей секции кристаллизатора. В общем случае возможны два вида отклонения уровня шлаковой ванны от его номинального значения (рис. 1).

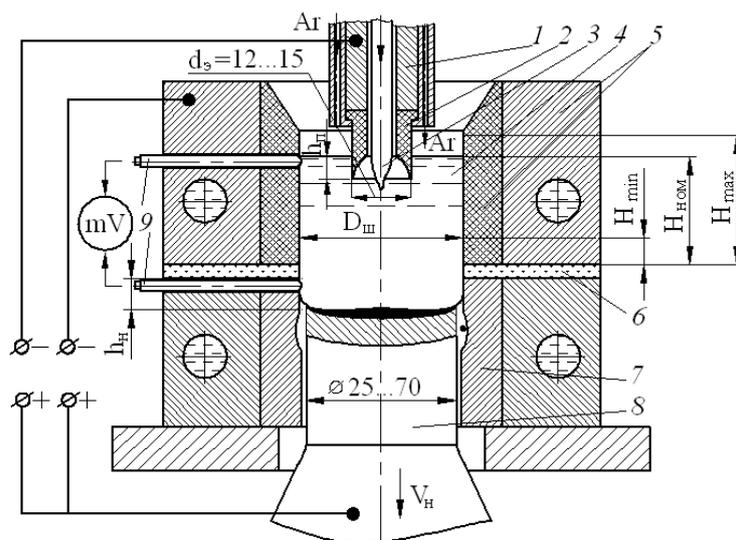


Рис. 3.1. Схема ЭШН в токоподводящем кристаллизаторе с полым неплавящимся электродом: 1 – токоподвод к полюсу электроду; 2 – полый электрод; 3 – присадочная проволока; 4 – шлаковая ванна; 5 – разъемные токоподводящие секции; 6 – изолятор; 7 – сменная формирующая секция кристаллизатора; 8 – наплавляемое изделие; 9 – датчики для контроля уровней шлаковой ванны и металлической ванны; 10 – изолятор в разьеме токоведущей секции.

С увеличением диаметра наплавляемого изделия уровень шлаковой ванны можно увеличивать до высоты  $H_{ном}$  при этом распределение тока в шлаке сохраняется неизменным. В случае нарушения дозирования флюса уровень шлаковой ванны изменяется. Если уровень шлаковой ванны превышает величину  $H_{max}$ , то выделяющейся в шлаке тепловой мощности недостаточно для качественного ведения процесса в возросшем объеме шла-

ка. Это приводит к образованию у поверхности токоподводящей секции тонкого слоя закристаллизовавшегося шлака, в результате чего металл не формируется. При уменьшении уровня шлаковой ванны ниже значения  $H_{\min}$  перегрев шлака в меньшем объеме ванны приводит к нарушению устойчивости процесса ЭШН и металл также плохо формируется.

Такой же эффект наблюдается если расстояние  $h_{\text{п}}$  между изолятором и поверхностью металлической ванны минимально, вследствие чего значения  $h_{\text{п}}$  поддерживают в пределах  $0,2 \dots 0,25 D_{\text{ш}}$ . Расположение металлической ванны на этом уровне позволяет ей хорошо формироваться на всей поверхности изделия.

Для качественного формирования наплавленного металла указанные выше параметры должны соответствовать соотношению:

$$h_{\text{п}} + H_{\text{ном}} + 2 \leq D_{\text{ш}} - 0,5d_3, \quad (1)$$

$$H_{\text{ном}} = bD_{\text{ш}} + h, \quad (2)$$

где  $D_{\text{ш}}$ ,  $D_{\text{ш}}$ ,  $d_3$  – средний диаметр шлаковой ванны, диаметр изделия и полового электрода, мм, соответственно;  $b$  – коэффициент пропорциональности, равный 0,17;  $h$  – необходимая высота шлаковой ванны для минимального диаметра изделия, равная 25 мм.

Выбор основных параметров ЭШН, представляющих функциональную взаимосвязь с диаметром наплаваемого изделия, иллюстрирует номограмма (рис. 2). При наплавке изделий диаметром более 70 мм при определении соотношения  $k$  величина тока на полном электроде увеличивается в  $n$  раз.

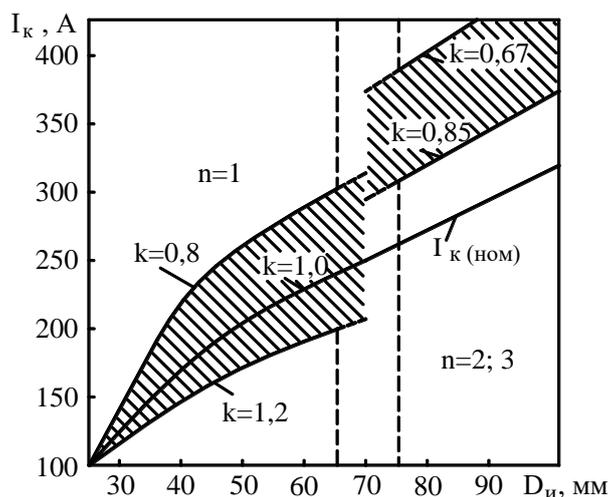


Рис. 3.2. Номограмма зависимости соотношения токов с токоподводящей секцией и с полого(ых) электрода(ов) – ( $k$ ) от диаметра, наплаваемого изделия:  $n$  – число полых электродов.

Распределение выделяемой в шлаке тепловой мощности позволяет в

первом приближении оценить величины проплавления основного металла, расход тепла на плавление присадочного материала и потери тепла. Количественно оценить тепловые процессы, характерные для ЭШН, можно с помощью расчета теплового баланса шлаковой ванны в "мгновенном" варианте.

В настоящее время существуют различные методики расчета теплового баланса шлаковой ванны, базирующиеся на уравнении теплопроводности и не всегда учитывающие технологические особенности процесса, способ подвода тока к шлаку и его точную температуру. Результаты же, полученные при определении теплового баланса электрошлаковой сварки, не могут быть использованы вследствие существенного отличия между процессами сварки и наплавки.

Тепловой баланс при ЭШН в токоподводящем кристаллизаторе имеет вид:

$$Q_{\text{Шк}} = q_{\text{кр}} + q_{\text{п}} + q_{\text{и}} + q_{\text{м}} + q_{\text{к}} + q_{\text{п}}, \quad (3)$$

где,  $Q_{\text{Шк}}$  – тепловая мощность, выделяющаяся в шлаковой ванне от ее нагрева током, проходящим в контуре "токоподводящая секция кристаллизатора – изделие"; тепловая мощность, передаваемая шлаковой ванной радиационным путем (с индексом «р»), теплопроводностью и конвекцией следующим потребителям теплоты:  $q_{\text{п}}$  – присадочной проволоке;  $q_{\text{м}}$  – металлической ванне,  $q_{\text{и}}$  – наплавляемому изделию,  $q_{\text{кр}}$ ,  $q_{\text{к}}$  – токоподводящей секции кристаллизатора,  $q_{\text{п}}$  – потери в окружающую среду.

Тепловой баланс в токоподводящем кристаллизаторе с полым неплавящимся электродом (см. ф. 4) отличается от теплового баланса ЭШН по традиционной схеме тем, что в левой части равенства (3) присутствует теплота  $Q_{\text{Шэ}}$ , вносимая в шлак от его нагрева током, проходящим в контуре "полый электрод – изделие", а в правой части – теплоты  $q_{\text{эр}}$ ,  $q_{\text{э}}$ .

$$Q_{\text{Шк}} + Q_{\text{Шэ}} = q_{\text{кр}} + q_{\text{п}} + q_{\text{и}} + q_{\text{м}} + q_{\text{к}} + q_{\text{п}} + q_{\text{эр}} + q_{\text{э}} \quad (4)$$

Количество джоулевого тепла, выделяющегося за короткий отрезок времени на вылете полого электрода, очень мало и в расчетах во внимание не принимается.

При стабильном процессе ЭШН расход тепла равен его приходу. Теплота шлаковой ванны расходуется преимущественно за счет теплопроводности, но небольшая ее часть передается радиационным путем  $Q_p$  (излучением):

$$Q_p = [C] \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] H \quad (5)$$

где,  $[C]$  – приведенный коэффициент излучения, для окружающей среды равный  $4,56 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ ;  $T_1$  и  $T_2$  – абсолютные температуры излучателя – тела 1 и приемника тепла – тела 2, К;  $H$  – взаимная излучающая поверхность тел 1 и 2,  $\text{м}^2$ .

В тепловых расчетах для различных характерных случаев взаимного расположения излучающей и принимающей тепло поверхностей, величина  $H$  является геометрическим параметром, который определяется в зависимости от размеров и формы поверхностей контактирующих тел, расстояния между ними. Для процессов ЭШН с использованием кристаллизаторов рационально рассматривать взаимодействие контактирующих поверхностей как взаимно перпендикулярных (рис. 3): шлаковая ванна – излучатель теплоты ( $F_1$ ), и один из ее приемников ( $F_2$  – контактирующая со шлаком поверхность кристаллизатора, электрода и т. п.). В этом случае  $H = \varphi_{12}F_1 = \varphi_{21}F_2$ , или  $H = \varphi' (1 - f) F_1$ , а излучающие поверхности (шлаковая ванна и контактирующие с ней поверхности кристаллизатора, электрода и т. д.) приводятся к прямоугольной форме. Локальный угловой коэффициент облучения  $\varphi'$  характеризует долю энергии, передаваемой на поверхность  $F_2$ , а коэффициент  $f$  – занятость поверхности шлаковой ванны присадочным или электродным материалом (табл. 1). Для определения потерь тепла в окружающее пространство принимают  $\varphi = 1$ .

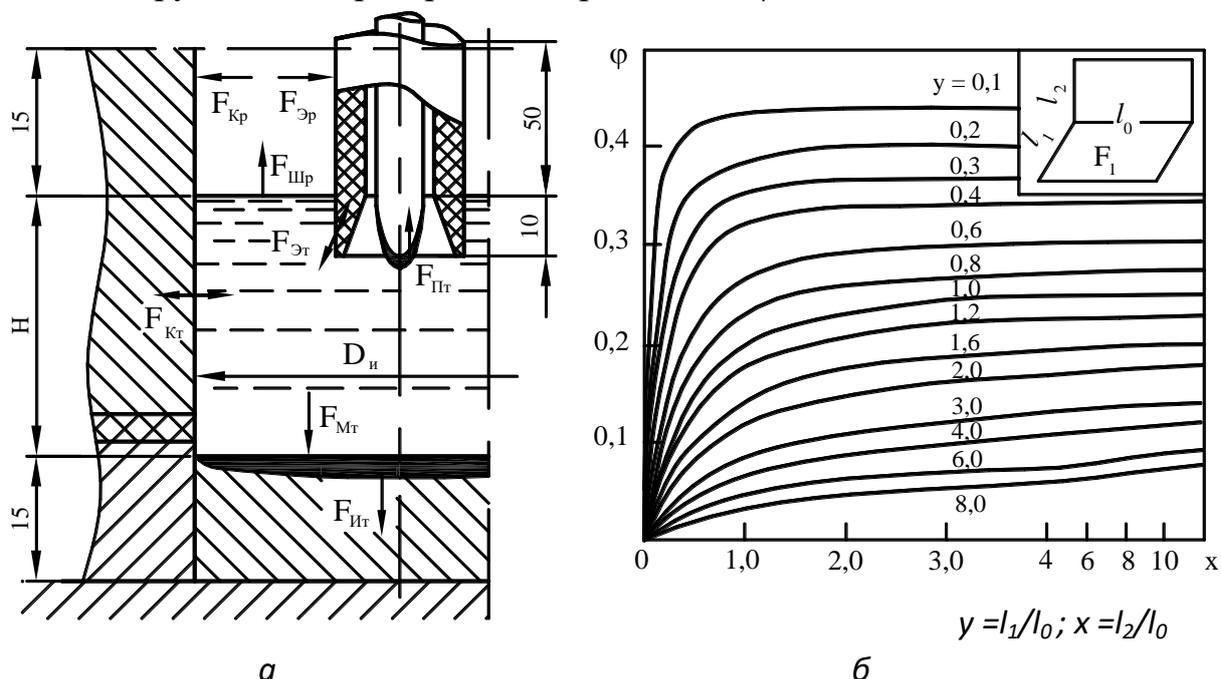


Рис. 3.3. Схема расхода теплоты шлаковой ванны (а) и значение углового коэффициента  $\varphi'$  излучения для взаимно перпендикулярных поверхностей (б).  $F_{K(p, T)}$ ,  $F_{Э(p, T)}$ ,  $F_{Шр}$ ,  $F_{ПТ}$ ,  $F_{МТ}$ ,  $F_{ИТ}$  – поверхности теплопередачи путем излучения (р) и теплопроводностью (Т): кристаллизатора, электрода, шлаковой ванны, присадочного материала, металлической ванны и изделия, соответственно.

Входящий в формулу (5) приведенный коэффициент излучения  $[C]$

рассчитывается по формуле:

$$[C] = C_s \varepsilon_{np} \quad (6)$$

где  $C_s = 4,96$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>К);  
 $\varepsilon_{np}$  – приведенная степень черноты, зависящая от степени черноты.

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_{1p}}{F_{2p}} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}, \quad (7)$$

где,  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – степень черноты для каждой пары контактирующих поверхностей приемника и излучателя тепла, соответственно.

Для расчета распределения теплоты за счет излучения можно принять, что температура полого электрода, присадочной проволоки, кристаллизатора и в лаборатории равна 293 К. Температура поверхности шлаковой ванны по показаниям пирометра 2273 К. Рекомендации по выбору значений коэффициентов  $\varepsilon_i$  и  $f$ , приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры взаимного излучения шлаковой ванны с приемниками теплоты

Параметры	Шлак	Диаметр шлаковой ванны, мм					
		25...50			50...90		
		поверхности приемников					
		кристаллизатора	электрода	присадочной проволоки	кристаллизатора	электрода	присадочной проволоки
$\varepsilon_1$	-	0,78		0,65	0,78		0,65
$\varepsilon_2$	0,85	-					
f	-	-	0,25	0,12	-	0,14	0,07

Ввиду незначительной свободной поверхности шлака в полости электрода, в случае подачи через него присадочного материала, взаимным излучением между шлаком и присадочной проволокой можно пренебречь. Все тепло, расходуемое при электрошлаковой наплавке, определяется по выражению

$$Q_n = \sum U_i I_i \quad (8)$$

где  $U_i, I_i$  – величины напряжения и тока каждого из источников сварочно-

го тока.

Тогда количество теплоты передаваемой кристаллизатору, неплавящемуся электроду, присадочной проволоке и металлической ванне за счет одновременного действия теплопроводности и конвекции определяется как:

$$Q_T = Q_{\Pi} - Q_P \quad (9)$$

где  $Q_{\Pi}$  и  $Q_P$  полная и радиационная тепловые мощности, Вт.

Так как в начальный (до 5 с после наведения шлаковой ванны для диаметров наплавляемого изделия до 30 мм) период времени металлическая ванна еще не существует, то приемником теплоты в этот период является только поверхность наплавляемого изделия. После наведения шлаковой ванны температура охлаждающей кристаллизатор воды достигает (25...35 °С) и остается практически постоянной в течение всего процесса наплавки. Такое тепловое равновесие кристаллизатора связано с тем, что с увеличением высоты наплавленного металла количество передаваемой тепловой мощности кристаллизатору снижается пропорционально произведению площади соприкосновения с кристаллизатором и температуры по этой площади. Кроме того, одновременно с падением температуры наплавленного металла и его затвердеванием ухудшается его тепловой контакт с поверхностью кристаллизатора.

Для оценки распределения теплоты, передаваемой путем теплопроводности и конвекции при установившемся электрошлаковом процессе можно допустить, что в кристаллизатор поступает тепло только от шлаковой ванны. Для расчета необходимо определить действительные температуры приемников теплоты  $t_i$ .

В процессе наплавки температуры шлаковой ванны и приемников теплоты изменяются в весьма широких пределах – от комнатной до 2000-3000 К. Поэтому в расчетах удобно использовать понятие средней, или эффективной, температуры приемников теплоты и шлаковой ванны. Под такой температурой понимают температуру, которую имела бы ванна или приемник теплоты, если бы все содержащееся в ней тепло было равномерно распределено по их объему.

В ходе процессов ЭШН и ЭШС в шлаковой ванне существуют высоко- и низкотемпературная области. В первой области под влиянием источника нагрева происходит нагрев металла, во второй – его охлаждение. При ЭШН плавящимся и неплавящимся электродом высокотемпературная область шлака располагается вблизи торца электрода, а низкотемпературная – составляет остальной объем шлаковой ванны. В способах ЭШН с использованием токоподводящего кристаллизатора подающийся в шлаковую ванну присадочный материал, как правило, электронейтрален, а результате циркуляции шлака температура шлаковой ванны усредняется и составляет  $t_{ш} = 2000-2300$  К. Если ЭШН осуществляется в токоподводящем кристаллизаторе с неплавящимся полым электродом, то в его полости погружен-

ной в шлак, существует высокотемпературная область, в которой шлак нагрет до температуры  $t_{ш}^1 = 3000-3200$  К. Тепло, выделяющиеся в этой области, преимущественно обуславливает нагрев и расплавление присадочной проволоки. Поэтому при определении усредненного коэффициента теплопередачи  $\alpha_{cp}$  и количества тепла  $Q_{Ti}$  передаваемого присадочной проволоки необходимо использовать температуру шлака  $t_{ш}^1$ , а для остальных приемников тепла –  $t_{ш}$ . Значения  $\alpha_{cp}$  и  $Q_{Ti}$  определяют по уравнениям:

$$\alpha_{cp} = \frac{Q_T}{\sum_{i=1}^n F_i \Delta t_i + \sum_{i=1}^n F_i \Delta t_i^1}, \quad (10)$$

$$Q_{Ti} = \alpha_{cp} F_i \Delta t_i, \quad Q_{Ti} = \alpha_{cp} F_i \Delta t_i^1, \quad (11)$$

где  $F_i$  – площади приемников теплоты шлаковой ванны  $F_{СКТ}$ ,  $F_{ЭТ}$ ,  $F_{ИТ}$ ,  $F_{МВТ}$ ,  $F_{ПТ}$ ;  $\Delta t_i$ ,  $\Delta t_i^1$  – разность температур приемника теплоты и шлака  $t_{ш}$  и  $t_{ш}^1$ , соответственно.

Для оценки теплового баланса при установившемся процессе можно использовать справочные данные (табл. 2).

Таблица 2

Температуры  $t$  поверхностей теплопередачи при установившемся процессе ЭШН

$t_K$	$t_{МВ}$	$t_{И}$	$t_{П}$	$t_{Э}$
473-673	1700-1800	1200-1300	250-350	2700-2900

Отрицательное значение  $Q_{Ti}$  показывает, что при направлении градиента распространения тепла от поверхности теплопередачи, в шлаке, контактирующем с рассматриваемой поверхностью, выделяется тепла больше, чем необходимо для поддержания электрошлакового процесса. Это означает, что избыток тепла может расходоваться на нагрев и расплавление присадочной проволоки, что нужно учитывать при определении общего количества тепла  $Q_{ТП}$  поступающего из шлаковой ванны в проволоку.

Для качественного протекания процесса электрошлаковой наплавки требуется равенство (с учетом потерь) тепловых мощностей: передаваемой шлаковой ванной элементарному объему плавящейся проволоки –  $Q_{ТП}$  и необходимой для расплавления этого объема проволоки –  $Q_H$ .

При решении задачи теплопроводности полагают, что прогрев присадочной проволоки в шлаке по ее радиусу равномерен и градиент темпера-

тур представляется в виде соотношения разности температур шлака и проволоки в высокотемпературной области к диаметру проволоки. Таким образом, необходимую для расплавления присадочной проволоки тепловую мощность можно рассчитать по формуле:

$$Q_n = V_n F \rho [c_{cp} (T_{пл} - T_n) + q_{ск}] \quad (12)$$

где  $F$  – "мгновенная" площадь погруженной в шлак поверхности проволоки,  $m^2$ ;  $V_n$  – скорость погружения проволоки в шлак,  $m/c$ ;  $T_n$ ,  $T_{пл}$  – температуры,  $^{\circ}C$  – начальная и плавления проволоки, соответственно;  $\rho$  – плотность элементарного объема металла проволоки,  $кг/м^3$ ;  $c_{cp}$  – удельная теплоемкость,  $Дж/г \cdot K$ ;  $q_{ск}$  – скрытая теплота плавления,  $Дж/кг$ ;

При задании производительности наплавки  $G_n$ ,  $кг/с$ , формулу 12 можно представить в виде  $Q_n = G_n [c_{cp} (T_{пл} - T_n) + q_{ск}]$ .

## 5. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

### 5.1. Материалы и приспособления

- 1) токоподводящий кристаллизатор и сварочные выпрямители ВДУ-504 и ВДУ-1001;
- 2) полые графитовые электроды диаметром 12 и 15 мм;
- 3) стальной цилиндр диаметром 30 и 70 мм;
- 4) плавный флюс (АН-20, АН-15, АНФ-6);
- 5) наплавочная проволока (Св-08, ПП-25Х5ФМС).

### 5.2. Последовательность выполнения работы

1. По заданным диаметрам изделия с помощью номограммы (рис. 2) и по формуле (2) определить основные параметры режима ЭШН: номинальный сварочный ток на токоподводящей секции (ток на полем электроде), требуемую высоту шлаковой ванны. Полученные данные свести в таблицу 3.

Значения напряжения на шлаке для случая ЭШН в ТПК рекомендуется выбирать:

- для изделий диаметром до 50 мм  $U_K = 30-36$  В;
- для изделий диаметром 50-100 мм  $U_K = 35-40$  В.

Значения напряжения на шлаке для случая ЭШН в ТПК с полым электродом рекомендуется выбирать из следующих диапазонов:

- для изделий диаметром до 50 мм  $U_K = 18-24$  В,  $U_{\text{Э}} = 20-26$  В;
- для изделий диаметром более 50-100 мм  $U_K = 24-30$  В,  $U_{\text{Э}} = 26-32$  В.

## Исходные данные

Диаметры, мм			Схема ЭШН						Н, мм	G, г/с
			ЭШН в ТПК		ЭШН в ТПК с полым электродом					
изде- де- лия	про- воло- ки	элек- трода	$I_{K(ном)}$ , А	$U_K$ , В	$I_K$ , А	$U_K$ , В	$I_Э$ , А	$U_Э$ , В		

Производительность наплавки ЭШН в ТПК для рассмотренных режимов рационально назначать из диапазона 3-8 г/с. Большим значениям производительности соответствуют электрический режим с большими значениями сварочного тока и напряжения.

2. Рассчитать тепловой баланс шлаковой ванны в токоподводящем кристаллизаторе для наплавки изделий различных диаметров.

2.1. Определить по ф. 5-7 тепло  $Q_p$ , передаваемое радиационным путем. Результаты расчета по определению расхода теплоты посредством излучения занести в табл. 4.

## Распределение теплоты за счет излучения

Поверхности теплопередачи	$F_{ip}, \text{м}^2$ $\times 10^{-4}$	$H, \times 10^{-4}$		[C],		$Q_p$			
		м <sup>2</sup>		кВт/м <sup>2</sup> К		кВт	%	кВт	%
		1	2	1	2	1		2	
Стенка кристаллизатора, $F_{кр}$									
Электрод, $F_{Эр}$									
Присадочный материал, $F_{Пр}$									
Потери в окружающее пространство			–						
Все тепло, переданное посредством радиации			–	–			100		100

1 – ЭШН в ТПК, 2 – ЭШН в ТПК с полым электродом

2.2. На основании заданных температур шлаковой ванны и рассчитанных площадей поверхностей теплопередачи вычислить по ф. 10 и 11 усредненный коэффициент теплопередачи  $\alpha_{ср}$  и количество теплоты  $Q_{Ti}$ , передаваемое по разным приемникам. Поверхности потребителей теплоты (рис. 2) шлаковой ванны рассчитывать согласно исходным данным.

Результаты расчета распределения теплоты, передаваемой за счет теп-

лопроводности при установившемся режиме наплавки привести в табл. 5. Распределение всей тепловой энергии шлаковой ванны для установившегося периода наплавки всеми способами теплопередачи свести в табл. 6.

Таблица 5

Распределение теплоты за счет теплопроводности  
(при установившемся режиме наплавки)

Приемники тепла	$F_{iT}, \text{ м}^2 \times 10^{-4}$	$\alpha_{\text{ср}}$		$\Delta t$	$Q_T$			
		$\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К} \times 10^{-3}$		К	кВт	%	кВт	%
		1	2		1		2	
Токоподводящая секция кристаллизатора, $F_{KT}$								
Неплавящийся электрод, $F_{ЭТ}$								
Металлическая ванна, $F_{MT}$								
Присадочный материал, $F_{ПТ}$								
Изделие, $F_{ИТ}$								
Все тепло, переданное теплопроводностью		—		—				100

Таблица 6

Распределение теплоты всеми способами теплопередачи

Приемник тепла	Распределение тепла при наплавке							
	кВт						%	
	радиационным путем		путем теплопроводности		всего			
	1	2	1	2	1	2	1	2
Токоподводящая секция кристаллизатора								
Неплавящийся электрод								
Изделие								
Присадочная проволока								
Потери шлаковой ванны на излучение			—					
Итого							100	

2.3. По формуле 12 определить количество тепла, необходимого для расплавления элементарного объема проволоки, и сопоставить его величину

ну с общим количеством тепла шлаковой ванны, поступающего в присадочную проволоку. Если  $Q_n$  окажется при сравнении больше количества тепла, поступающего из шлаковой ванны в проволоку, то в процессе наплавки в сварочной ванне будут находиться нерасплавившееся металлические частицы и наплавленный металл будет формироваться неудовлетворительно. Поэтому необходимо или повысить тепловую мощность процесса, увеличив ток и напряжение, или создать в шлаке высокотемпературную область, введя в шлаковую ванну полый неплавящийся электрод.

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по работе оформляется в соответствии с установленными требованиями и должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) теоретическую часть;
- 3) таблицу исходных данных и результаты расчета теплового баланса ЭШН в токоподводящем кристаллизаторе, сведенные в табл. 2-5;
- 4) выводы по работе, включающие обоснование: – результатов распределения тепловой мощности шлаковой ванны по приемникам тепла; – количества, тепла необходимого для расплавления присадочной проволоки и обеспечиваемого рассчитанным тепловым режимом ЭШН.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите возможные в процессе ЭШН в ТПК отклонения расположения уровня шлаковой ванны от его номинального значения.
2. Как определить количество теплоты, передаваемой от шлаковой ванны за счет теплопроводности и конвекции?
3. С чем связан повышенный расход тепла через стенку токоподводящей секции ТПК?
4. Что понимают под тепловым равновесием системы кристаллизатор – шлаковая ванна?
5. Какими способами можно уменьшить тепловые потери шлаковой ванны?
6. Какое направление имеет градиент температуры в шлаке у поверхности неплавящегося полого электрода?
7. Как влияет удельная площадь присадочного материала на величину тепловложения в него?
8. Какое условие, характеризующие качество ЭШН в ТПК необходимо выполнить, если требуется увеличить производительность наплавки?

## 8. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1) Теория сварочных процессов; под ред. В. В. Фролова. Учебник. М.: Высшая школа, 1988. – 560 с.
- 2) Электрошлаковая сварка и наплавка; под ред. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1980. – 511 с.
- 3) Латаш, Ю. В. Электрошлаковый переплав / Ю. В. Латаш, Б. И. Медовар; под общ. ред. Б. Е. Патона. – М.: Metallurgy, 1971. – 240 с
- 4) Соколов, Г. Н. Наплавка износостойких сплавов на прессовые штампы и инструмент для горячего деформирования сталей: научная монография / Г. Н. Соколов, В. И. Лысак; Волгоград / ВолгГТУ. – 2005. – 284 с.

### **6. Расчет режимов дуговой наплавки цилиндрических изделий из углеродистых низколегированных сталей**

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Освоить методику расчета технологических и тепловых параметров режима дуговой наплавки цилиндрических изделий.

#### 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

- 2.1. Изучить основы теории образования трещин.
- 2.2. Изучить экспериментальные и расчетные методики оценки склонности наплавленного металла к образованию трещин.
- 2.3. Для заданного типа наплавляемой металлической конструкции обосновать и выбрать оптимальные экспериментальные и расчетные методики испытаний на склонность металла к образованию горячих и холодных трещин.

#### 3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА РЕЖИМА

Расчет параметров режима дуговой наплавки под флюсом (рис. 3.1) предусматривает выполнения условия удовлетворительного формирования металла и отделимости шлаковой корки.

Расчет режимов наплавки ведется исходя из достижения максимальной производительности и минимальной величины проплавления основного металла.

2) Определяют сварочный ток в зависимости от диаметра наплавляемого изделия по таблице:

Рекомендованные значения сварочного тока для различных диаметров наплавляемого изделия

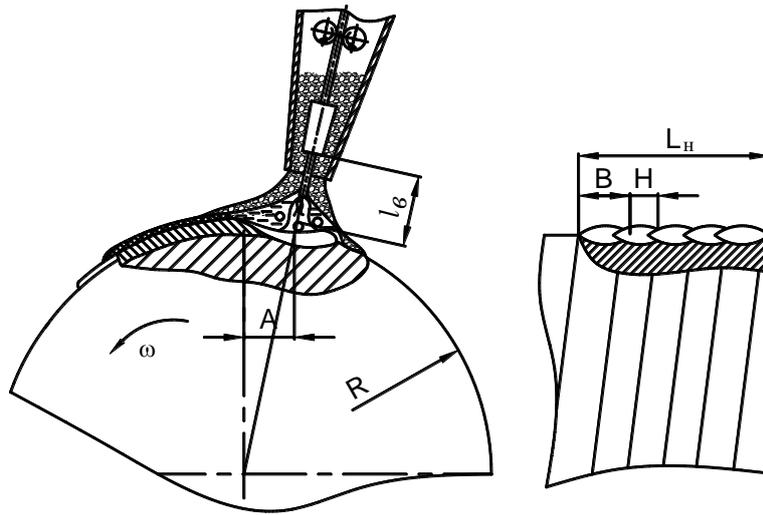


Рис. 3.1 – Схема дуговой наплавки под флюсом:  $R$  – радиус наплавляемой детали, мм;  $L_n$  – длина наплавляемого участка, мм;  $B$  – ширина валика наплавленного металла, мм;  $H$  – шаг наплавки, мм;  $A$  – смещение электрода от зенита, мм;  $L_b$  – вылет электрода, мм.

Таблица 1 – Зависимость сварочного тока от диаметра изделия

Диаметр изделия, мм	Сварочный ток $I_{св}$ , А при диаметре электродной проволоки, мм	
	1,2-1,6	2,0-2,5
50-60	120-140	140-160
60-80	150-170	180-220
80-120	180-200	230-280
120-200	190-250	300-350
200-300	250-300	350-380

3) Определяют напряжение на дуге  $U$ :

$$U = 2I + 0,04 \cdot I_{св}, B \quad (1)$$

4) Определяют коэффициент наплавки  $K_n$ , характеризующий ее производительность:

$$K_n = 2,3 + 0,065 \cdot \frac{I_{св}}{d_{пр}}, з/А \cdot ч \quad (2)$$

где  $I_{св}$  – сварочный ток, А;  $d_{пр}$  – диаметр электродной проволоки, мм.

5) Определяют скорость перемещения дуги, или скорость наплавки обусловливаемой шириной валиков и глубиной проплавления:

$$V_n = \frac{K_n \cdot I_{св}}{100 \cdot F \cdot \gamma}, м/ч \quad (3)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения наплавленного валика, см<sup>2</sup> (при  $d_{пр} = 1,2 \dots 2$  мм  $F = 0,06 \dots 0,2$  см<sup>2</sup>),  $\gamma$  – плотность металла наплавленного валика, г/см<sup>3</sup>.

6) Определяют частоту вращения детали:

$$n = \frac{V_n}{60 \cdot \pi \cdot D}, \text{ мин}^{-1} \quad (4)$$

где  $D$  – диаметр наплавляемого изделия, м;

7) Определяют скорость подачи электродной проволоки  $V_n$  с учетом того возможности ее полного расплавления:

$$V_n = \frac{4 \cdot K_n \cdot I_{св}}{\pi \cdot d_{np}^2 \cdot \gamma} [\text{м/ч}] \quad (5)$$

8) Устанавливают величину вылета электродной проволоки  $S$ . При увеличении вылета электродной проволоки повышается электрическое сопротивление цепи, что приводит к росту коэффициента расплавления, снижению сварочного тока, а следовательно, и глубины проплавления.

$$S = (10-15) \cdot d_{np} \quad (6)$$

9) Определяют шаг наплавки:

$$H = (2-2,5) \cdot d_{np} \quad (7)$$

10) Определяют величину смещения электрода  $A$  с зенита в сторону, противоположную вращению изделия:

$$A = (0,05-0,07) \cdot D \quad (8)$$

11) Определяют основное и вспомогательное время наплавки:

$$T_o = \frac{L_n}{n \cdot H}, \text{ мин} \quad (9)$$

где  $L_n$  – длина (ширина) наплавляемой поверхности, мм.

Вспомогательное время  $T_v$  затрачиваемое на настройку, пуск наплавочного автомата, на выключение установки, очистку наплавленной поверхности от шлаковой корки.

Дополнительное время  $T_{доп}$  составляет 15 % от оперативного времени. Оперативное время  $T_{оп}$  состоит из суммы основного и вспомогательного времени. Подготовительно-заключительное время  $T_{пз} = 16$  мин. Нормируемое время выражается формулой

$$T_n = T_o + T_v + T_{доп} + \frac{T_{пз}}{n_{шт}}$$

12) Определяют длину сварочной ванны, мм:

$$L = p \cdot U_d \cdot J_{св} \quad (11)$$

где  $L$  – длина сварочной ванны;  $U_d$  – напряжение на дуге, В;  $I_{св}$  – сварочный ток, А;  $P \approx 3,2 \times 10^{-4}$  см/В·А.

Для обеспечения качественного наплавленного металла необходимо чтобы в процессе наплавки исключался перегрев изделия смежными валиками обуславливающий стекание сварочной ванны.

Удовлетворяющую условиям качественного формирования наплавленного металла и отделимости шлаковой корки в конце наплавки погонную энергию дуги можно определить используя расчетный метод. Мето-

дика заключается в определении температур нагрева изделий смежными валиками при наплавке с предварительно выбранной погонной энергией и сравнении их с обуславливающими предельное состояние допустимыми температурами (500-550 °С), когда наплавка уже невозможна по причине перегрева и стекания сварочной ванны.

В случае если изделие представляет сплошной цилиндр, эти температуры рассчитывают по формулам:

$$\zeta_{\text{спл}} = \frac{T_n \cdot R \cdot c\gamma \cdot \sqrt{a \cdot t}}{q_{\text{п}}}, \quad (12)$$

для полых цилиндров:

$$\zeta_{\text{пол}} = \frac{T_n \cdot 2\delta \cdot c\gamma \cdot \sqrt{a \cdot t}}{q_n} \quad (12)$$

где  $\zeta_{\text{спл}}$  и  $\zeta_{\text{пол}}$  – относительные температура нагрева цилиндра смежными валиками;  $q_{\text{п}}$  – погонная энергия дуги, Дж/см;  $\delta_{\text{пр}}$  – приведенная толщина стенки полого цилиндра  $\delta_{\text{пр}} = (R^2 - r^2) / 2R$ , см;  $c\gamma$  – объемная теплоемкость, Дж/см<sup>3</sup>·град;  $a$  – коэффициент температуропроводности, см<sup>2</sup>/с;  $t$  – время одного оборота точечного источника нагрева, с.

В практике предельное состояние наплавляемых цилиндров рассчитывают при значительной длине наплавки. При этом сравнивают относительные температуры предельного состояния – допустимые  $\zeta_{\text{пр.доп}}$  и обеспечиваемые рассматриваемым режимом  $\zeta_{\text{пр}}$ .

$$\zeta_{\text{пр}} = \zeta_{\text{пол}} \cdot \beta \quad (13)$$

где  $\beta$  – коэффициент, учитывающий влияние ограниченности цилиндра по длине.

Предельно допустимые относительные температуры рассчитывают по формуле [8]:

$$\zeta_{\text{пр.доп}} = 1/v [1 - \text{erf}(v/\sqrt{2})] \quad (14)$$

где  $v = \frac{\xi}{2\sqrt{\tau}}$  – безразмерный критерий, учитывающий  $\xi = \frac{H}{R}$  – относительный шаг наплавки ( $H$  и  $R$  – размерные шаг наплавки и радиус цилиндра, см) и  $\tau = a \cdot t / R^2$  – безразмерное время одного оборота источника тепла.  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $t$  – время одного оборота источника. При расчете  $\xi$  для случая наплавки полого цилиндра, вместо  $R$  следует использовать приведенную толщину стенки  $\delta_{\text{пр}}$ . Функция  $\text{erf}(x)$  – функция интеграла вероятности Гаусса может быть определена по графику (рис. 3.2) или при помощи ЭВМ.

Количество наплавленных витков, соответствующих предельному состоянию, рассчитывают по выражению:

$$N_{np} = \left( \frac{1,8}{\nu} \right)^2 \quad (15)$$

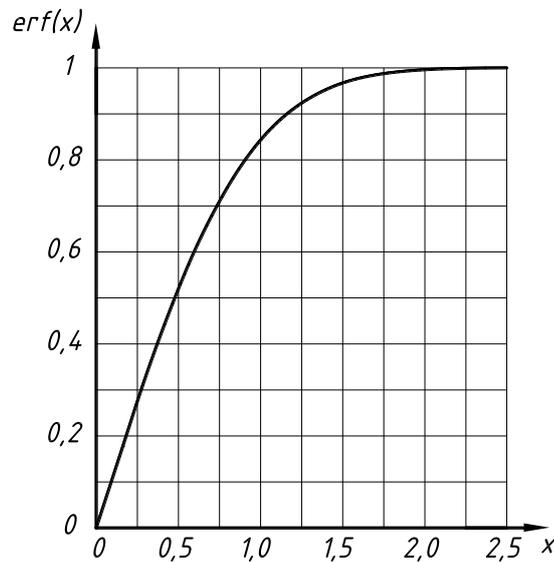


Рис. 3.2. – График величины функции  $erf(x)$  от аргумента  $x$ .

Коэффициент  $\beta$  рассчитывают по формуле:

$$\beta = 1 + \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\exp\left[-\frac{\nu^2 \cdot (2l^* + i)^2}{i}\right]}{\sqrt{i}}}{\sum_{i=1}^N \frac{\exp(-\nu^2 \cdot i)}{\sqrt{i}}} \quad (16)$$

$$\nu = H / 2 \sqrt{at}, \quad (17)$$

где  $l^*$  – расстояние по оси от основного источника нагрева до торца цилиндра, принимаем  $l^* < 0$ , если нагрев ведется от торца цилиндра, и  $l^* > 0$  – если наоборот.

Если предельная безразмерная температура  $\zeta_{np}$  окажется при сравнении больше предельно допустимой,  $\zeta_{np} > \zeta_{пр.доп}$  то в конце наплавки деталь будет перегреваться. Поэтому надо или снизить погонную энергию дуги или применить принудительное охлаждение детали в зоне окончания наплавки.

Одним из основных параметров режима наплавки является мгновенная скорость охлаждения  $w_0$  околошовной зоны при температуре  $T_m$  наименьшей устойчивости аустенита, находящейся для большинства конструкционных сталей в пределах (500-600 °С). Для случая наплавки валика

на массивное тело связь  $w_0$  с погонной энергией дуги можно представить формулой:

$$w_{0расч} = 2\pi \cdot \lambda \frac{(T_m - T_0)^2}{q_n} \quad (10)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности стали, Вт/м·град;  $T_m$  – температура начала мартенситного превращения, определяют по термокинетическим диаграммам изотермического распада переохлажденного аустенита для конкретной марки стали, °С;  $T_0$  – температура предварительного подогрева, °С;  $q_n$  – погонная энергия сварочной дуги, Дж/с.

Полученную скорость охлаждения сравнивают с данными термокинетической диаграммы превращения переохлажденного аустенита.

#### 4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

##### 4.1. Оборудование и материалы

- 1) наплавочная установка У-653;
- 2) цилиндрическое стальное изделие заданного диаметра;
- 3) наплавочная сплошная или порошковая проволока;
- 4) сварочные флюсы АН-20С, АН-26;
- 5) секундомер;
- 6) зубило, молоток, ножницы.

##### 4.2. Последовательность выполнения работы

1. Изучить методические указания и получить допуск на выполнение работы (контролируются знания: процесса дуговой наплавки электродной проволоки, устройство и назначение узлов установки У-653 и работа ее электрической схемы).

2. Подготовить установку к работе, установить изделие, подготовить наплавочные материалы, и опробовать взаимодействие узлов установки в холостом режиме.

3. По заданному диаметру изделия, ширине наплавляемого слоя, диаметру электрода рассчитать основные параметры режима наплавки и наплавить экспериментальные валики, изменяя скорость поперечных перемещений электрода, напряжение на дуге, вылет электрода и сварочный ток.

#### 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по работе оформляется в соответствии с установленными требованиями и должен содержать следующие пункты

- цель и задачи работы;
- теоретическую часть;
- схему наплавки;
- исходные данные (таблица 2) и результаты расчета.
- результаты визуально-измерительного контроля наплавленных валиков (ширина и высота валика);
- выводы, включающие оценку достоверности исследования на основании сопоставления результатов выбранной экспериментальной методики и расчетных критериев.

Таблица 2 – Исходные данные для расчета предельного теплового состояния наплавляемого изделия

$U$	$I$	$T_n$	$\delta$	$a$	$c\gamma$	$t$	$H$	$l$	$\lambda$	$V_n$
В	А	°С	м (см)	м <sup>2</sup> /с (см/с)	МДж/м <sup>3</sup> ·К (кал/см <sup>3</sup> ·гр)	с	м (см)	м (см)	Вт/м·К (кал/см·с· гр)	м/с (См/с)

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

В чем заключается природа образования горячих трещин, возникающих при наплавке и сварке?

Что представляет собой температурный интервал хрупкости?

Какова разновидность горячих трещин?

Дать классификацию методов испытаний наплавленного металла и сварных швов на склонность к образованию горячих трещин.

В чем заключается методика испытаний сварных соединений на образование горячих трещин на образцах с принудительной жесткостью и реальным циклом сварки?

Какие методы испытаний к горячим трещинам более предпочтительны для наплавленных валиков, расположенных вдоль образца?

Какие легирующие элементы в наплавленном металле способствуют образованию горячих трещин?

В чем заключается природа и механизм холодных трещин в сварных соединениях?

Какова разновидность холодных трещин?

Каковы основные факторы, обуславливающие образование холодных трещин?

В чем заключаются расчетные методы определения склонности металла к образованию холодных трещин?

Объяснить сущность лабораторных методов испытаний на склонность сварных соединений к образованию холодных трещин: Тэккен, СТС, «Крестовой пробы».

## 7. РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Теория сварочных процессов / под ред. В. М. Неровного ; МГТУ им. Н. Э. Баумана; М. : 2007. – 752 с.

2. Гривняк, И. Свариваемость сталей / И. Гривняк ; пер. со словац. Л. С. Гончаренко под ред. Э. Л. Макарова. – М. : Машиностроение, 1984. – 229 с.

3. Шоршоров, М. Х., Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке : атлас / М. Х. Шоршоров, В. В. Белов. – М.: Наука, 1972. – 229 с.

### **7. Изучение методики расчета состава порошковых проволок для сварки и наплавки**

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить методику расчета состава порошковых проволок. Рассчитать шихту порошковой проволоки на заданный состав наплавленного металла.

#### 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

- 2.1. Изучить конструкции и назначение порошковых проволок.
- 2.2. Усвоить методику расчета состава шихты порошковых проволок.
- 2.3. На заданный химический состав наплавленного металла рассчитать состав шихты порошковой проволоки.

#### 3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3.1. Конструкция и назначение порошковых проволок для сварки и наплавки

Применяющиеся в качестве электродного материала для дуговой и электрошлаковой наплавки и сварки порошковые проволоки состоят из металлической токоподводящей оболочки трубчатого или более сложного сечения (рис. 3.1) [1, 4] и порошкообразной шихты, содержащей металлические и неметаллические газо- и шлакообразующие компоненты. Химический состав наплавленного металла определяется составом компонентов шихты и материалом оболочки проволоки.

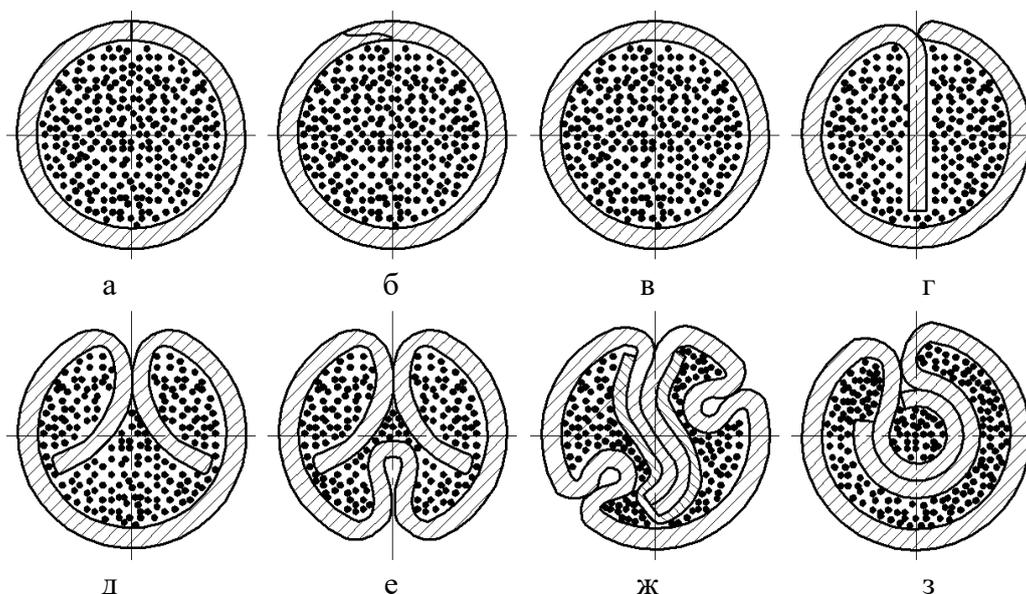


Рис. 3.1. Конструкции сечений порошковых проволок: а – трубчатая; б – трубчатая с перекрытием; в – трубчатая безстыковая; г – с одной загнутой кромкой; д – с двумя загнутыми кромками; е – усложненная; ж – сложнозагибная; з – двухслойная.

Формой и размером оболочки задается коэффициент заполнения порошковой проволоки шихтой ( $K_3$ ), определяемый соотношением масс шихты ( $G_{ш}$ ) и проволоки ( $G_{пр}$ ).

$$K_3 = \frac{G_{ш}}{G_{пр}}, \quad (3.1)$$

Коэффициент заполнения  $K_3$  порошковых проволок для наплавки под флюсом составляет преимущественно 0,2...0,45, для наплавки в защитных газах 0,15...0,3, а для самозащитных порошковых проволок, содержащих в составе шихты газо- и шлакообразующие компоненты, 0,25...0,5. При коэффициенте заполнения более 0,5...0,6 из-за недостаточного уплотнения шихты, снижения прочности оболочки и ухудшения устойчивости горения дуги снижается технологическая надежность материала, что обуславливает применение таких проволок только для экспериментальных работ. Допустимое отклонение  $K_3$  от номинального значения не должно превышать 9...10 %.

Для дуговой под флюсом и электрошлаковой наплавки наибольшее применение нашла порошковая проволока со стыковым и нахлесточным соединением кромок (рис. 3.1, б, в). Она проста в изготовлении, обеспечивает максимальный коэффициент заполнения и позволяет получать наплавленный металл любого химического состава, но имеет следующие недостатки: гигроскопичность, сепарация и высыпание шихты, неравномерное плавление шихты и оболочки. Более эффективна бесшовная порошковая проволока (рис. 3.1, а), получаемая путем вибрационного заполнения гранулированным металлическим порошком длинномерных (до 500

мм) трубок с последующим волочением их до заданного диаметра. Но такая технология пока не освоена в РФ.

Выровнять скорость плавлений оболочки и шихты, улучшить как эффективность защиты расплавленного электродного металла, так и технологические показатели наплавки самозащитными порошковыми проволоками позволяют конструкции, в которых часть металлической ленты располагается в полости, образованной оболочкой (рис. 3.1, г-з). В зависимости от коэффициента формы порошковой проволоки, равного отношению количества ленты, расположенной внутри полости, к количеству ленты, использованной для образования оболочки, проволоки известных конструкций располагаются в следующей последовательности (табл. 3.1).

Относительная себестоимость изготовления материала определяется соотношением себестоимостей проволок рассматриваемой и простой трубчатой конструкции. Служащий обобщенным показателем эффективности использования самозащитной порошковой проволоки выход годного наплавленного металла определяется как отношение его массы (за вычетом потерь на разбрызгивание) к массе расплавленной проволоки [3].

Таблица 3.1

Характеристика конструкций самозащитных порошковых проволок

Условное обозначение конструкции (см. рис. 3.1)	Коэффициент формы	Относительная себестоимость изготовления	Выход годного при наплавке металла
а, б, в	0	100	0,75
г	0,31	150	0,77
д	0,57	145	0,77
г	0,7	110	0,78
е	0,73	150	0,75
з	1,3	140	0,8

С целью обеспечения основных сварочно-технологических характеристик порошковые проволоки должны удовлетворять следующим требованиям:

- 1) не содержать компонентов, которые в смеси реагируют между собой;
- 2) обеспечивать удовлетворительные санитарно-гигиенические условия при изготовлении и применении;
- 3) иметь стабильный коэффициент заполнения шихтой;
- 4) обладать достаточной механической прочностью и плотностью, не допускающей высыпания шихты;
- 5) обеспечивать устойчивое горение дуги, равномерное плавление оболочки и сердечника с минимальными потерями металла на разбрызгивание и окисление;

б) обеспечивать хорошее деформирование наплавленного слоя и отделимость шлака;

7) образовывать бездефектный наплавленный металл с заданными свойствами и химическим составом.

Маркировка порошковой проволоки производится разработчиком, в ней содержится сокращенное наименование организации и назначение материала, более полно оговоренное в стандарте или технических условиях. К примеру, порошковые проволоки, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона, маркируются: с ПП-АН1 до ПП-АН100 – сварочные, а свыше ПП-АН101 – наплавочные.

### 3.2. Методика расчета состава порошковой проволоки

В практике широко применяется методика расчета проволок трубчатой конструкции, разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона. Целью расчета является определение состава ПП, который при определенном коэффициенте заполнения проволоки обеспечит заданный химический состав наплавленного металла или сварного шва.

Для расчета компонентного состава сердечника ПП необходимы следующие данные:

1) химический состав металла шва или наплавленного сплава.

2) расчетный химический состав проволоки, устанавливаемый в зависимости от химического состава наплавленного металла с учетом окисления легирующих элементов в процессе наплавки и доли участия основного металла в наплавленном;

2) процентное соотношение масс сердечника и оболочки в ПП (коэффициент заполнения);

3) химический состав материалов, используемых для изготовления проволоки (металлической ленты, порошков металлов, ферросплавов, минералов и других компонентов).

Расчет производится исходя из требуемой массы  $M_{\text{ПП}}$  (кг) и диаметра проволоки  $D_{\text{ПП}}$  (мм).

Чтобы получить в наплавленном металле необходимое содержание химических элементов в состав проволоки следует в соответствии с коэффициентами их перехода в конкретных условиях сварки ввести несколько большее количество легирующих порошков.

Коэффициенты перехода легирующих элементов из проволоки в наплавленный металл, учитывающие их потери в реакционной зоне сварки на окисление, испарение, переход в шлак и т.д., выбирают приближенно, используя известные данные (табл. 3.2), а затем экспериментально уточняют их и корректируют.

При расчете необходимо учитывать, что коэффициенты перехода зависят от способа и режима сварки или наплавки, преимущественно от си-

лы сварочного тока и напряжения на дуге, содержания компонента в проволоке, наличия раскислителей, грануляции порошков в сердечнике ПП и от системы легирования наплавленного металла. Наличие в составе сердечника активных раскислителей, к примеру, титана и алюминия способствует увеличению коэффициентов перехода всех легирующих элементов, содержащихся в проволоке, и дает возможность повысить усвоение сварочной ванны марганца и кремния из флюса.

Таблица 3.2

Приближенные значения коэффициентов перехода легирующих элементов из проволоки в наплавленный металл

Коэффициент перехода:	Легирующие элементы												
	C	Cr	Mn	Si	W	Mo	Ti	V	Nb	Ni	Al	Zr	Ta
при дуговой наплавке в аргоне	0,75	0,7	0,6	0,6	0,7	0,7	0,3	0,6	0,7	1	0,4	0,25	0,65
при дуговой наплавке под флюсом	0,6	0,65	0,5	0,6	0,65	0,65	0,2	0,5	0,6	1,0	0,2	0,15	0,6
при ЭШН	0,85	0,85	0,75	0,75	0,85	0,85	0,4	0,7	0,8	1,0	0,4	0,45	0,8

Если ПП предназначена для однопроходной сварки или наплавки, то при определении расчетного химического состава проволоки необходимо предварительно с использованием модельной ПП с железным порошком выполнить сварку и наплавку экспериментальных образцов.

Затем на металлографических шлифах определить долю участия основного и наплавленного металла (рис. 3.2) по формуле:

$$\gamma_0 = \frac{F_0}{F_0 + F_H}, \quad (3.1)$$

где  $\gamma_0$  – доля участия основного металла в наплавленном или в шве;  $F_0$  и  $F_H$  – соответственно площадь поперечного сечения проплавленного основного и наплавленного металла, мм<sup>2</sup>.

Доля наплавленного металла ( $\gamma_H$ ) определяется соотношением:

$$\gamma_H = 1 - \gamma_0, \quad (3.2)$$

На следующем этапе необходимо пересчитать химический состав ПП с учетом коэффициента перехода в наплаваемый металл легирующих элементов из ПП и примеси от участия в нем из основного металла по

$$\gamma_0 = \frac{F_0}{F_0 + F_H}, \quad (3.1)$$

формуле:

$$[X]_э = \frac{[X]_{ш} - \gamma_o [X]_o}{k_{п} \cdot \gamma_{н}}, \quad (3.3)$$

где  $[X]_{ш}$ ,  $[X]_o$ ,  $[X]_э$  – содержание элемента соответственно в наплавленном, основном и электродном металлах;  $k_{п}$  – коэффициент перехода легирующего элемента (таблица 3.1).

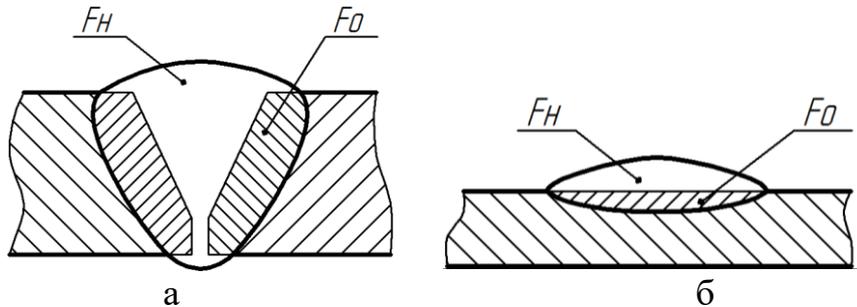


Рис. 3.2 – Схемы поперечного сечения стыкового соединения (а) и наплавленного металла (б)

При многослойной сварке, когда последующий валик (рис. 3.2) накладывают в разделке на основной металл ( $F_o$ ) и предыдущий валик ( $F_{n-1}$ ), их долю в образовании металла  $n$ -го валика также следует учитывать. В этом случае площадь поперечного сечения шва ( $F_{ш}$ ) будет определяться по формуле:

$$F_{ш} = F_o + F_{н} + F_{n-1} \quad (3.4)$$

Соответственно доли участия каждого компонента в формировании шва

$$\gamma_o = \frac{F_o}{F_{ш}}, \quad (3.5)$$

$$\gamma_{n-1} = \frac{F_{n-1}}{F_{ш}}, \quad (3.6)$$

$$\gamma_{н} = 1 - \gamma_o - \gamma_{n-1} \quad (3.7)$$

Если свариваются разнородные металлы, значительно различающиеся по химическому составу, участие их в формировании шва учитывается следующим образом:

$$F_{ш} = F_{o1} + F_{o2} + F_{н} + F_{n-1} \quad (3.8)$$

Соответственно доля их участия в формировании шва:

$$\gamma_{o1} = \frac{F_{o1}}{F_{ш}} \quad (3.9)$$

$$\gamma_{o2} = \frac{F_{o2}}{F_{ш}} \quad (3.10)$$

Содержание рассматриваемого элемента в металле  $n$ -го шва:

$$[X]_{\text{э}} = \frac{[X]_{\text{ш}} - \gamma_o [X]_o - \gamma_{n-1} [X]_{n-1}}{k_{\text{п}} \cdot \gamma_{\text{н}}}, \quad (3.11)$$

Расчет состава ПП ведут на 100 г проволоки. Химический состав материалов для приготовления шихты приведен в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Химический состав материалов для изготовления порошковых проволок,  
масс. %

Материал	Химические элементы										
	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>W</i>	<i>V</i>	<i>Mo</i>	<i>Ti</i>	<i>Nb</i>	<i>Al</i>	<i>S</i>
Стальная лента	0,11	0,42	0,02	–	–	–	–	–	–	–	0,038
Ферровольфрам В2	0,68	0,18	0,45	–	75,2	–	–	–	–	–	0,072
Феррохром Хр6	7,36	0,8	1,26	66,8	–	–	–	–	–	–	0,02
Феррованадий Вд1	0,6	1,9	3,85	–	–	50,5	–	–	–	–	0,04
Ферромарганец Мп4	6,6	76,9	1,52	–	–	–	–	–	–	–	0,015
Феррониобий	0,12	–	0,05	–	–	–	–	1,7	61,5	3,3	–
Ферромolibден	0,04	–	0,2	–	–	–	60,4	–	–	–	–
Ферротитан	0,03	–	–	–	–	–	0,8	66,5	–	3,1	–
Феррокремний Си75	0,18	0,8	75,5	–	–	–	–	–	–	–	–
Железный порошок	0,04	0,12	–	–	–	–	–	–	–	–	0,01
Графит серебристый ГСМ-2	99,9	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Примечание: остальное железо.

Необходимое количество компонента, через который вводится тот или иной легирующий элемент, определяют по формуле:

$$P = \frac{[X]_{\text{э}} \cdot 100}{b}, \quad (3.12)$$

где  $P$  – масса компонента сердечника ПП, г;  $[X]_{\text{э}}$  – необходимое количество рассчитываемого легирующего элемента в сердечнике проволоки, г;  $b$  – содержание рассматриваемого легирующего элемента во вводимом компоненте, масс. %.

Поскольку с любым, кроме чистых порошков металлов, графита и химических соединениях компонентом сердечника могут вноситься сопутствующие легирующие элементы, то их количество учитывают и определяют по выражению:

$$d = \frac{P \cdot c}{100}, \quad (3.13)$$

где  $d$  – масса сопутствующего легирующего элемента, г;  $c$  – содержание сопутствующего элемента во вводимом компоненте, масс %;  $P$  – масса вводимого компонента, г.

Необходимо помнить, что с металлической лентой также вносятся сопутствующие легирующие элементы. В случае если суммарное количество примесей превышает допустимое, то материал, вносящий чрезмерное количество этих примесей, необходимо заменить на компонент, в котором содержание их минимально или ввести чистый порошок металла.

Далее производится предварительный расчет коэффициента заполнения ПП ( $K_3^p$ ) по формуле:

$$K_3^p = \sum_{i=1}^n m_{\text{ком}}, \quad (3.14)$$

где  $m_{\text{ком}}$  – массовая доля всех компонентов сердечника с учетом сопутствующих примесей.

Выбор геометрических параметров (толщины и ширины) ленты для изготовления оболочки экспериментальной ПП производится в соответствии с данными таблицы 3.4.

Таблица 3.4

Значения коэффициентов заполнения трубчатой ПП, обеспечиваемые различными лентами

Диаметр проволоки, мм	3,6			3,0			2,5		
Ширина ленты, мм	15			12			10		
Толщина ленты, мм	0,8	0,5	0,4	0,8	0,5	0,4	0,8	0,5	0,4
Коэффициент заполнения, $K_3$	0,28... 0,3	0,38... 0,4	0,52... 0,55	0,22... 0,25	0,3... 0,33	0,4... 0,42	0,18... 0,2	0,28... 0,3	0,33... 0,38

Далее приготавливают порошковую смесь (50...100 г) и изготавливают ПП 6-ти, 4-х кратным редуцированием. После вырезки из средней части ПП отрезка длиной 100 мм его взвешивают на весах с точностью не менее чем до третьего знака после запятой, а затем удаляют сердечник и определяют массу оболочки.

Далее по формуле 3.15 определяют массу сердечника ( $M_c^{\text{экс}}$ ):

$$M_c^{\text{экс}} = M_{\text{ПП}}^{\text{экс}} - M_{\text{об}}^{\text{экс}} \quad (3.15)$$

где  $M_{\text{ПП}}^{\text{экс}}$  – масса отрезка ПП;  $M_{\text{об}}^{\text{экс}}$  – масса оболочки ПП.

По полученным значениям определяется фактический коэффициент ( $K_3$ ) заполнения:

$$K_3 = \frac{M_c^{\text{экс}}}{M_{\text{ПП}}^{\text{экс}}}, \quad (3.16)$$

В случае если  $K_3 > K_3^p$ , то для их выравнивания используют нейтральные добавки (для сплавов на основе железа – железный порошок). Для подавления порообразования в состоящую преимущественно из ферросплавов шихту вводят 1,5...2 % кремнефтористого натрия (Na-SiF<sub>6</sub>).

В случае если  $K_3 < K_3^p$ , производят уточняющий расчет. Для этого сначала определяют удельную массу сердечника в обжатом состоянии ( $\rho_c$ ):

$$\rho_c = \frac{M_c^{\text{экс}}}{\frac{\pi}{4}(d - 2s)^2 \cdot L}, \quad (3.17)$$

где  $d$  – диаметр ПП;  $s$  – толщина оболочки ПП;  $L$  – длина отрезка ПП (100 мм).

Зная  $\rho_c$ , можно точно рассчитать толщину оболочки ( $s$ ), необходимую для обеспечения требуемого коэффициента заполнения ( $K_3^p$ ):

$$s = \frac{d}{2} \left( 1 - \frac{\sqrt{K_{\text{П}}}}{K_{\text{П}}} \right), \quad (3.18)$$

где коэффициент  $K_{\text{П}}$ , зависящий от физических свойств компонентов ПП, рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{П}} = \frac{\rho_c}{\rho_{\text{об}}} \left( \frac{1}{K_3^p} - 1 \right) + 1, \quad (3.19)$$

где  $\rho_{\text{об}}$  – удельная масса металла оболочки.

Толщина оболочки ( $s$ ) должна соответствовать номенклатурному значению выпускаемых в промышленности металлических лент. Для этого значение  $s$  округляют в большую сторону и уточняют расчетом коэффициента заполнения  $K_3^p$ :

$$K_3^p = \frac{\frac{\rho_{\text{об}}}{\rho_c}}{\frac{d^2}{4(d \cdot s - s^2)} - 1} + 1 \quad (3.20)$$

Ширину ленты ( $h$ ) рассчитывают по формуле:

$$h = 1,06 \cdot \pi(D - s) \quad (3.21)$$

где  $D$  – диаметр формирующей волоки.

По рассчитанным геометрическим параметрам металлической ленты изготавливают небольшое количество ПП и повторно определяют фактический коэффициент заполнения.

Если  $K_3 = K_3^p$ , то изготавливают небольшое (1,5...2 кг) количество проволоки и экспериментально определяют коэффициенты перехода легирующих элементов в данной системе легирования при выбранном виде за-

щиты и способе наплавки. Затем уточняют химический состав проволоки и повторно рассчитывают состав сердечника уже с учетом экспериментальных данных. Состав сердечника уточняют до тех пор, пока не достигнут заданного химического состава наплавленного металла или сварного шва.

#### 4. ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- 1) сварочный автомат;
- 2) весы для взвешивания шихты и проволоки;
- 3) ножницы по металлу;
- 4) порошки металлов, ферросплавов и минералов;
- 5) лента стальная;
- 6) сварочные флюсы АН-15, АН-17, АН-20С, АН-20П, АН-26, АН-60, АН-348.

#### 5. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теоретическую часть и методику расчета ПП..
2. На заданный преподавателем наплавленный металл (табл. 5.1) рассчитать состав шихты и выбрать размер ленты для порошковой проволоки требуемого диаметра.

Таблица 5.1

Тип наплавленного металла				
1	2	3	4	5
дуговая наплавка в защитных газах				
90X5M7B2Ф	40X5M2ФСГ	20X3B4MФ	20X3M2B2Г	30X5M4ГТ
6	7	8	9	10
дуговая наплавка под флюсом				
50X6MФС	35B9X3СФ	30X2B5Ф	40X5MГС	45X6M2B2ГС

3. Результаты расчета свести в таблицу 6.2.
4. Сделать выводы по работе.

#### 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по работе оформляется в соответствии с установленными требованиями и должен содержать:

- цель и задачи работы;
- теоретическую часть;
- химический состав металла, на который производится расчет проволоки (табл. 6.1);

Таблица 6.1

Химический состав наплавленного металла, масс. %

Материал	Химические элементы									
	<i>C</i>	<i>Cr</i>	<i>W</i>	<i>V</i>	<i>Mo</i>	<i>Ti</i>				
...										

- химический состав материалов, из которых изготавливается порошковая проволока (табл. 6.2);

Таблица 6.2

Химический состав материалов, из которых изготавливается порошковая проволока, %

Материал	Химические элементы									
	<i>C</i>	<i>Cr</i>	<i>W</i>	<i>V</i>	<i>Mo</i>	<i>Ti</i>				
...										

- таблица с результатами расчета порошковой проволоки (табл. 6.3);

Таблица 6.3

Расчетный химический состав экспериментальной порошковой проволоки

Материал (лента, ферросплав, минерал, мет. порошок и т.д.)	Содержание компонента в проволоке, г	Примеси, г							Содержание компонента в шихте, %
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Итого суммарный химический состав, %	100,00								100,00

Примечание: в таблицу включаются все основные и сопутствующие примеси, содержащиеся в ленте и ферросплавах.

- выводы по работе, включающие обоснование не в форме аннотации, а в виде логически вытекающих из результатов работы положений, касающихся расчета порошковой проволоки.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как определить коэффициент заполнения порошковой проволоки шихтой?
2. Как определить коэффициент формы порошковой проволоки и на что он влияет?
3. Какие требования предъявляются к исходным материалам для изготовления порошковых проволок?
4. Как снизить содержание пор и трещин при дуговой наплавке порошковой проволокой?
5. По каким формулам рассчитывают содержание легирующего компонента и сопутствующей примеси в шихте проволоки?
6. Как уточняют расчетный состав шихты порошковой проволоки?
7. Какие исходные данные необходимы для расчета конкретного состава порошковой проволоки?

## 8. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Наплавочные материалы стран- членом СЭВ. Каталог / Под ред. И. И. Фрумина. – Киев. – М.: ВИНТИ. – 1979. – 620 с.
2. Фрумин И. И., Юзвенко Ю. А., Лейначук Е. И. Технология механизированной наплавки. – М.: Высшая школа. – 1964. – 304 с.
3. Походня И. К., Альтер В.Ф., Шлепаков В.Н. и др. Показатели изготовления и использования порошковых проволок различной конструкции // Сварочное производство. – 1985. – № 8. – С. 33-34.
4. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. акад. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение. – 1974. – 768 с.

### **8. Изучение технологии изготовления наплавочных порошковых проволок на волочильном стане ОБ-575**

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить технологию производства порошковых проволок и изготовить экспериментальную партию материала на однобарабанном волочильном стане.

#### 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

2.1. Изучить технологию изготовления композиционной и порошковой проволоки со стыковым соединением кромок на однобарабанном волочильном стане.

2.2. Изготовить экспериментальную партию порошковой проволоки.

2.3. С применением изготовленной порошковой проволоки дуговым способом под флюсом наплавить необходимое количество валиков и оценить устойчивость дугового процесса, качество наплавленного металла и отделимость шлака.

### 3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

#### 3.1. Технология изготовления порошковой проволоки

##### 3.3.1. Подготовка ленты

Для порошковых проволок используют преимущественно стальную (08 кп или 08 сп) холоднокатаную ленту с временным сопротивлением разрыву 300...350 МПа и относительным удлинением не менее 28 %. Лента должна быть первой или второй группы по качеству поверхности, особо мягкая (реже мягкая), нормальной точности изготовления с обрезанными кромками. Изготавливают проволоку и из никелевой (марки НП-2) мягкой ленты. Конкретные размеры сечения ленты для каждой марки порошковой проволоки ограничиваются техническими условиями на ее изготовление и зависят от конструкции и диаметра проволоки. Обычно применяется лента толщиной 0,2...1,0 мм и шириной 8...20 мм. Поверхность ленты перед использованием должна быть тщательно очищена от смазки, вызывающей дефекты в наплавленном металле. Для предотвращения обрывов проволоки в процессе ее изготовления ленту с нагартованными при резке кромками рекомендуется подвергать отжигу в бесокислительных средах [1].

##### 3.3.2. Требования к порошкам и приготовление шихты

Основные требования к порошкам сводятся к постоянству их химического состава, чистоте по вредным примесям и размеру частиц. Химический состав порошков определяет тип и свойства обеспечиваемого проволокой наплавленного металла. Гранулометрический состав влияет на степень усреднения состава шихты по объему при перемешивании компонентов, на равномерность заполнения проволоки шихтой при дозировании, на стабильность процесса волочения и качество направленного металла.

После дозирования необходимого количества каждого из компонентов шихты их тщательно перемешивают. Перед смешиванием компоненты (за исключением легкоокисляемых, которые хранятся в герметичной таре) просушивают в течение двух часов при температуре 120...140 °С. Иногда операцию сушки совмещают с перемешиванием. Качество перемешивания шихты определяет ее однородность и зависит от насыпных масс компонентов (что влияет на сепарацию более тяжелых частиц), грануляции порошков и конструкции смесителя. При изготовлении небольших количеств шихты в лабораторных условиях рекомендуется ручное пе-

ремешивание в двухконусном смесителе в течение 1,0...1,5 часов. Качество готовой шихты определяется химическим анализом или путем взвешивания равных объемов, взятых из разных участков смеси.

### 3.3.3. Формирование исходной заготовки порошковой проволоки

Процесс изготовления порошковой проволоки заключается в последовательном выполнении на одной непрерывной линии операций формирования из ленты промежуточного профиля и трубчатой заготовки проволоки с одновременным заполнением ее шихтой.

При формировании профиля заготовки проволоки лента предварительно протягивается через направляющие и рабочие ролики, обеспечивающие ей желобчатую форму. Затем идет заполнение заготовки ПП шихтой. Заполненный профиль попадает в формующую волоку (рис. 3.1), в которой он сворачивается в трубку.

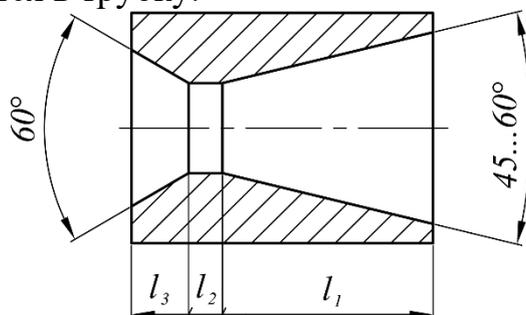


Рис. 3.1. Формующая волока:  $l_1$ ,  $l_2$  и  $l_3$  – соответственно формующий, калибрующий и выходной участки  $l_1 = 6 - 8(l_2 + l_3)$

Диаметр калибрующего участка формующей волоки ( $d_k$ ) выбирают в зависимости от ширины ленты ( $B$ ) по формуле:

$$d_k = \frac{B}{\pi} \quad (3.1)$$

Скорость сворачивания ленты в трубку при поступлении шихты самоотеклом принимают равной 5...10 м/мин. При более высоких скоростях протяжки из-за недостаточной сыпучести порошкообразной шихты в проволоке могут образовываться пустоты. В случае принудительной подачи шихты допустимы и большие скорости заполнения проволоки.

Шихта должна заполнить весь объем оболочки с небольшим уплотнением, что предотвратит ее высыпание при последующей перетяжке ПП на заданный диаметр. На поверхности сформированной проволочной заготовки не должно быть подрезов, вмятин, задиров, рисок и выступающих кромок. При волочении эти дефекты приводят к обрывам проволоки, что не позволяет применять высокие скорости протяжки и ведет к снижению производительности.

### 3.3.4. Волочение порошковой проволоки

Редуцирование ПП, как и проволоки сплошного сечения, осуществляют последовательной протяжкой через волоки с соответствующими калибрующими диаметрами (рис. 3.2).

Входная зона канала волоки служит для направления конца проволоки и подачи смазки в рабочую зону. В рабочей зоне волоки осуществляется деформация протягиваемой проволоки до заданного размера.

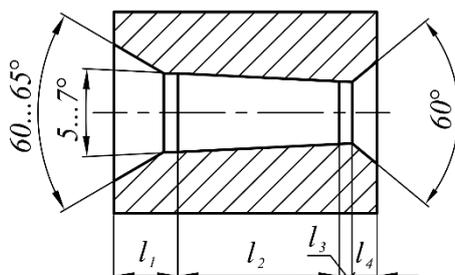


Рис. 3.2. Протяжная волока:  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  и  $l_4$  – соответственно входной, рабочий, калибрующий и выходной участки волоки.

В процессе протягивания порошковой проволоки практически невозможно учесть несовпадение осей заготовки ПП и волоки на входе или выходе из фильеры, неоднородность материала сердечника и оболочки по длине заготовки проволоки, ее поверхностные и внутренние дефекты, влияние окружающей среды на физико-механические свойства порошкового наполнителя, износ волоочильного оборудования и др. Все эти факторы способствуют значительному изменению силы и натяжения при редуцировании ПП и отклонению их от расчетных значений. Поэтому в первом приближении, пренебрегая величиной сопротивления порошкового наполнителя его уплотнению, величину пластической деформации оболочки можно считать соответствующей ее значению, характерному для процесса безоправочного волочения труб.

В процессе редуцирования на калибрующем участке волоки стабилизируется диаметр проволоки, а выходной участок предохраняет ее от повреждений. Для производства порошковой проволоки применяют металло-керамические (сплав ВК6 или ВК8) волоки с высоким классом чистоты обработки, от которой зависит сила трения на границе контакта проволоки и инструмента.

При редуцировании большое внимание уделяют первой протяжке, где поверхность проволоки покрывается сплошной пленкой смазки, снижающей трение. Подача смазки в волоку осуществляется проволокой, проходящей через волокодержатель, наполненный смазкой (смесь серебристого графита и стеарина, нефтяной парафин, мыло, синтетический мыльный порошок).

В процессе волочения проволоки различают частное обжатие (обжатие за один проход) и суммарное (за все проходы). Для построения маршрутов волочения порошковых проволок с последовательным уменьшением калибрующих диаметров волок используют следующий ряд частных обжатий, %: 5...12, 26...30, 22...25, 18...20, 15...47, 10...13. Первую протяжку осуществляют при самых малых обжатиях (устраняется овальность, вмятины, захватывается смазка), вторую – при самых больших, а в последующих проходах степень деформации проволоки снижают.

Одним из важных показателей, характеризующих обжатие проволоки при редуцировании, является ее коэффициент вытяжки, показывающий во сколько раз увеличивается длина проволоки. Обычно суммарная вытяжка при четырехкратном редуцировании составляет 1,5...2, а при шестикратном – 1,7...2,1. Плотность сердечника в проволоке конечного диаметра в 1,8...2,2 раза больше исходной плотности ее наполнителя. Толщина оболочки ПП после трех-четырёх протяжек изменяется незначительно и составляет около 95 % от толщины применяемой ленты. В дальнейшем утонение оболочки становится более заметным, и толщина ее составляет после шестой протяжки 80...85 % от исходного значения. Количество протяжек проволоки подбирается экспериментально из условия, что сердечник в готовой порошковой проволоке не должен высыпаться при разрыве оболочки. Обычно достаточно четырех-пяти перетяжек. Скорость редуцирования проволоки при перетяжках в два-четыре раза превышает скорость формовки заготовки. Выбор диаметра волок для перетяжки зависит от размеров ленты и калибрующего диаметра первой волоки (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Рекомендуемые диаметры волок для изготовления порошковых проволок

Сечение ленты, мм	Количество протяжек					
	1	2	3	4	5	6
	Диаметры волок, мм					
8 × 0,6	3,0	2,7	2,5	2,3	2,0	1,8
10 × 0,8	3,5	3,2	3,0	2,7	2,5	2,3
10 × 0,6	3,6	3,0	2,8	2,5	2,3	2,0
10 × 0,4	2,8	2,5	2,2	2,0	–	–
15 × 0,8	5,0	4,5	4,0	3,5	3,3	3,0
15 × 0,6	4,8	4,5	4,0	3,5	3,3	3,0
20 × 0,6	5,7	5,2	4,7	4,2	3,8	3,5

Другим важным технологическим показателем, характеризующим качественное протекание процесса редуцирования, является коэффициент запаса прочности:

$$K_3 = \sigma_{в об.} / \sigma_{т об.1} \quad (3.2)$$

где  $\sigma_{в об.}$  – предел прочности материала оболочки;  $\sigma_{т об.1}$  – предел текучести материала оболочки в сечении на выходе из участка деформации.

При малых значениях  $K_3$  в протягиваемом металле наблюдаются местные утонения (перетяжки), а иногда внутренние и даже полные разрывы. Большие значения коэффициентов запасов прочности связаны с высокой дробностью деформации (большое число переходов), от которой снижается производительность и увеличивается расход энергии. Следовательно, лучше вести процесс при оптимальных условиях, т. е. с минимальным числом переходов, при которых обеспечиваются надежные коэффициенты запаса прочности.

Результаты исследования процессов волочения показали, что при хорошо выполненных захватах (отсутствии надрывов и больших местных утонений металла), а также при плавном достижении рабочих скоростей волочения процесс идет надежно, если средние значения коэффициента запаса  $K_3 < 1,35 \dots 2,0$ . При этом больший коэффициент запаса прочности соответствует заготовкам с меньшим поперечным сечением.

### 3.3.5. Контроль качества проволоки

К основным нормируемым показателям качества порошковой проволоки относятся: химический состав металлической оболочки и компонентов порошкового наполнителя; плотность закрытия стыка оболочки, качество поверхности, плотность закрытия концов проволоки; правильность намотки и увязки мотков, диаметр проволоки; качество заполнения металлической оболочки порошковым наполнителем.

На готовой проволоке проверяют соответствие ее качества требованиям технических условий и стандарта, а также ее сварочно-технологические свойства. Оценивают механические свойства и химический состав металла шва и наплавленного металла. Сварочно-технологические свойства ПП, например, возможность сварки во всех пространственных положениях, в том числе способом сверху-вниз, определяются путем оценки смачиваемости и растекания, скорости затвердения, вязкости, поверхностных свойств шлаковой и металлической фаз.

Химический состав металлической оболочки и компонентов порошкового наполнителя проверяется по сопроводительным сертификатам качества предприятия-изготовителя исходного сырья.

Плотность закрытия фальцевого замка металлической оболочки проверяется щупами. Качество поверхности проволоки, плотность закрытия концов проволоки проверяют, как правило, визуальным осмотром, без применения увеличительных приборов.

Диаметр ПП и предельные отклонения с точностью до 0,01 мм контролируют в двух взаимно перпендикулярных направлениях одного сечения проволоки не менее чем на двух участках бунта, на расстоянии не менее одного метра от конца бунта. Допускаемые предельные отклонения диаметра ПП обычно составляют до  $\pm 0,12$  мм.

Одним из самых важных потребительских показателей ПП является качество заполнения оболочки порошковым наполнителем, которое на большинстве предприятий оценивается комплексом следующих величин:

1) Погонной массой проволоки:

$$\mu_{\text{ПП}} = \frac{m_{\text{обр}}}{l_{\text{обр}}} \text{ Г/М}, \quad (3.3)$$

где  $m_{\text{обр}}$  – масса образца проволоки, г;  $l_{\text{обр}}$  – длина образца проволоки, м.

2) Погонной массой наполнителя проволоки:

$$\mu_{\text{Н}} = \frac{m_{\text{пор}}}{l_{\text{обр}}} \text{ Г/М}, \quad (3.4)$$

где  $m_{\text{пор}}$  – масса порошкового наполнителя в образце проволоки, г;

3) Коэффициентом заполнения проволоки, представляющим собой отношение массы сердечника в образце проволоки мерной длины к массе этого образца:

$$k_3 = \frac{m_{\text{пор}}}{m_{\text{обр}}} * 100\% \quad (3.5)$$

Коэффициент заполнения наплавочной порошковой проволоки обычно не превышает 45 %, что в некоторой степени ограничивает возможности получения с помощью этих материалов некоторых типов высоколегированного наплавленного металла.

Для определения коэффициента заполнения ПП от каждого бунта отрезают от одного до трех образцов проволоки длиной примерно 1...2 м. Образец взвешивается с погрешностью не более 0,1 г на лабораторных весах по ГОСТ 24104-2001, вскрывается, оболочка тщательно очищается от порошкового наполнителя, который собирается в емкость, затем порошок взвешивается и для каждого образца определяется погонная масса проволоки, погонная масса наполнителя и коэффициент заполнения. Значение коэффициента заполнения для всей партии определяется как среднее арифметическое всех измерений, при этом каждое отдельное измерение должно быть в пределах, устанавливаемых ТУ на ПП. Для определения коэффициента заполнения также применяют неразрушающий контроль с применением приборов.

Как следует из формулы (3.5), с увеличением массы наполнителя, засыпаемого в оболочку, и уменьшением массы самой оболочки проволоки коэффициент заполнения повышается. Масса загружаемого наполнителя зависит от диаметра трубчатого полуфабриката и плотности порошка. Также следует отметить, что максимально возможный объем засыпаемого

наполнителя существенно зависит от гранулометрического состава порошка.

Очевидно, что коэффициент заполнения показывает лишь процентную долю наполнителя в проволоке и, вместе с тем, не в полной мере характеризует качество и стабильность работы технологического оборудования по изготовлению ПП, соответственно и качество самой ПП. Объем мерного отрезка проволоки зависит от геометрических параметров калибрующего инструмента и поэтому практически постоянен для каждого конкретного номинального диаметра ПП, а плотность порошкового сердечника определяется видом наполнителя, то есть масса порошка может изменяться от вида к виду в значительных пределах. Коэффициент заполнения для ПП с одинаковым наполнителем, но с разными диаметрами будет различным. То есть, при переходе на производство проволоки другого диаметра значение коэффициента заполнения изменится, и по нему нельзя будет судить о стабильности технологии.

#### 3.4. Волоочильный стан ОБ-575 для изготовления порошковой проволоки

В лабораторных условиях порошковую проволоку изготавливают на малогабаритных волоочильных станах. Лабораторный волоочильный стан ОБ-575 обеспечивает изготовление и протяжку порошковой проволоки трубчатой конструкции на скорости до 150 м/мин. Принципиальная схема стана представлена на рис. 3.3. Изготавливают проволоку в следующей последовательности:

1) на механизме для вальцевания конца проволоки, состоящем из двух валков с постепенно уменьшающимся диаметром ручьев, ленту вальцуют в трубку необходимого диаметра для подачи ее в формующую волоку;

2) пропустив ленту через очиститель, засыпное устройство и волокодержатель, захватывают ее конец зажимом, соединенным тросом или цепью с барабаном;

3) с помощью толчковой кнопки, расположенной на пульте управления стана натягивают трос, ленту и наматывают на барабан два – три витка пустой трубчатой оболочки;

4) в бункер засыпают предварительно приготовленную шихту, открывают заслонку бункера и шихта самотеком поступает на протягиваемую через засыпное устройство ленту;

5) пропустив через формующую волоку всю ленту стан останавливают, бухту порошковой проволоки снимают с барабана и устанавливают на кассету с вертикальной осью на верхней плите стана. Конец проволоки, обжимают на валках и через направляющие ролики подают в волоку меньшего диаметра для перетяжки.

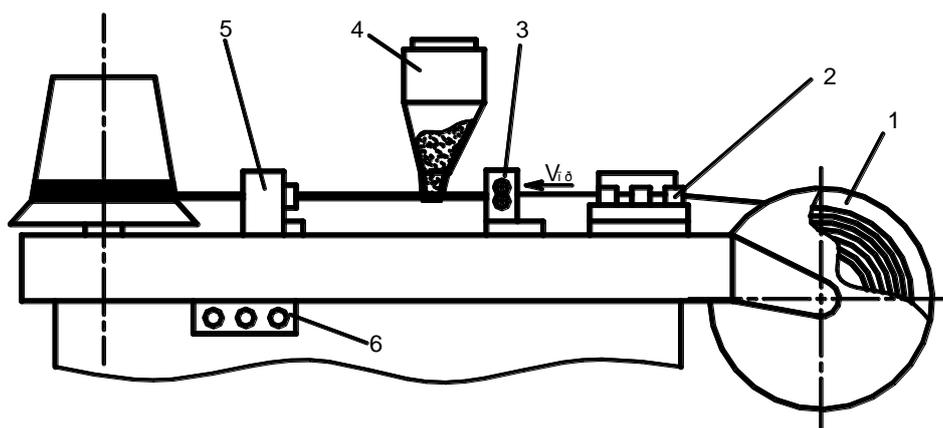


Рис. 3.3. Схема однобарабанного волочильного стана ОБ-575 для изготовления порошковой проволоки: 1 – кассета с лентой; 2 – приспособление для зачистки ленты; 3 – формующее устройство; 4 – дозатор шихты; 5 – фильера; 6 – пульт управления.

### Техника безопасности при работе на волочильном стане ОБ-575

Перед началом работы на волочильном стане необходимо на холостом ходу проверить исправность действия пусковых, остановочных и аварийных выключателей, исправность ограждений, инструмента и приспособлений.

Заправку ленты и проволоки в протяжное устройство стана необходимо производить в рукавицах, защитных очках или козырьках, при этом нельзя прикасаться руками к движущейся ленте или проволоке.

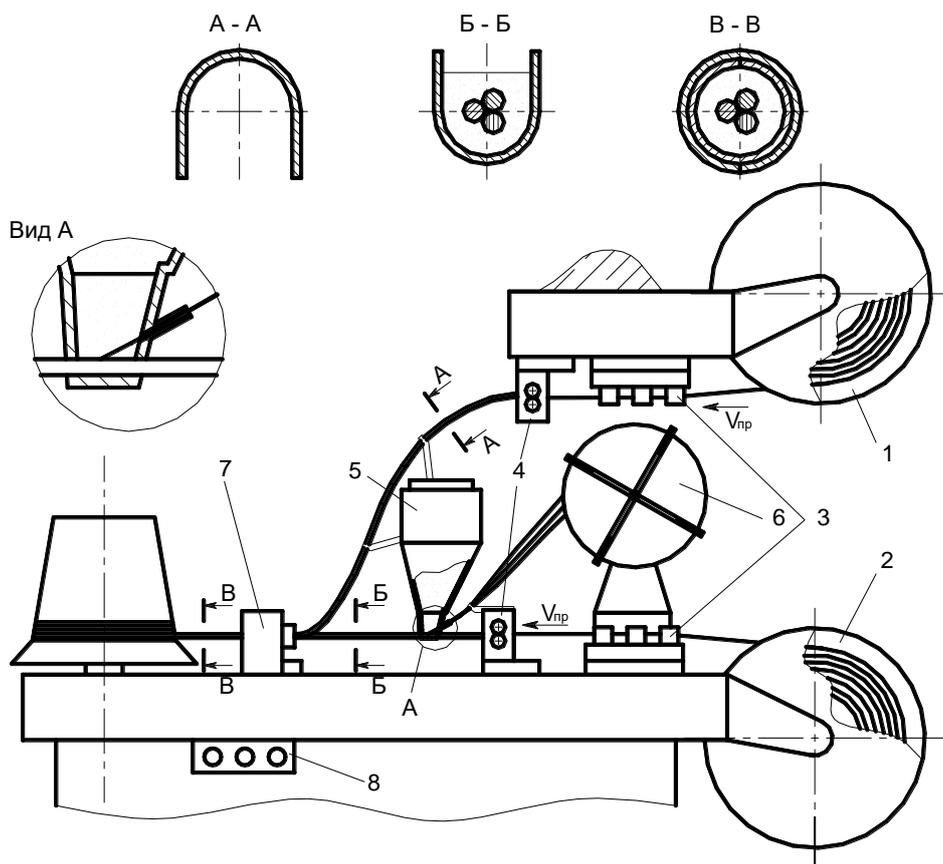
Во время заправки проволоки на барабан необходимо остерегаться захвата одежды вытяжным зажимом. Нельзя пускать стан, пока не будет убрана рука с зажимного устройства. Снимать зажимное устройство и исправлять положение проволоки на барабанах можно только после полной остановки стана.

Во время работы необходимо наблюдать за размоткой ленты, формированием проволоки и заполнением ее шихтой.

### 3.5. Технология изготовления композиционной проволоки

Для изготовления композиционной проволоки применяют такие же предварительные операции, как и в процессе производства порошковой проволоки.

Но технологический процесс волочения композиционной проволоки существенно отличается рис. 3.4 [3]. Технологические стыки двухслойной оболочки проволоки с шихтой, состоящей из металлических порошков и проволочных компонентов, располагают диаметрально противоположно и осуществляют совместное обжатие.



1 – кассета с лентой для внутреннего слоя оболочки; 2 – кассета с лентой для наружного слоя оболочки; 3 – приспособление для зачистки ленты; 4 – формирующее устройство; 5 – дозатор шихты; 6 – кассеты с проволоками из тугоплавких металлов; 7 – фильера; 8 – пульт управления

Рис. 3.4. Схема изготовления ПП на однобарабанном волочильном стане ОБ-575.

При изготовлении композиционной проволоки ленты внешнего и внутреннего слоев оболочки пропускают через формирующие устройства, придающие им форму сегментов цилиндрической поверхности. Затем ленту внутреннего слоя пропускают через дозатор, заполняющий ее шихтой, после чего обе заготовки слоев оболочки совместно обжимаются в фильере. В результате совместной деформации состоящих из разных материалов и контактирующих между собой слоев оболочки стык внутреннего слоя полностью закрывается, шихта равномерно обжимается и надежно герметизируется. При последующем волочении на заданный диаметр процесс повторяется, обеспечивая высокую степень уплотнения шихты без расслоений и обрывов проволоки.

#### 4. ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- 1) лабораторный стан ОБ-575;
- 2) весы для взвешивания шихты и проволоки;
- 3) шлифовально-заточной станок;

- 4) ножницы по металлу;
- 5) штангенциркуль;
- 6) порошки металлов, ферросплавов и минералов;
- 7) лента стальная.

## 5. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить методические указания и для рассчитанного в лабораторной работе № 1 и № 2 химического состава наплавленного металла, выбрать размер ленты для изготовления композиционной или порошковой проволоки требуемого диаметра.

2. Отвесить и смешать компоненты шихты, подготовить ленту и изготовить 2...2,5 кг композиционной или порошковой проволоки;

3. Экспериментально проверить коэффициент заполнения готовой проволоки и отклонение ее диаметра от заданного;

4. Подготовить оборудование, образцы и материалы для наплавки и под заданным преподавателем флюсом на постоянном токе обратной полярности наплавить 4...6 образцов, варьируя сварочный ток, напряжение на дуге и скорость наплавки;

5. По показаниям приборов оценить устойчивость дугового процесса. Визуально определить качество формирования наплавленного металла, наличие пор, трещин и отделимость шлака с поверхности валика.

6. Обработав на заточном станке поверхность наплавленного металла определить наличие пор, трещин, шлаковых включений внутри наплавленного валика;

7. Описать эксперимент, свести данные в таблицу 6.1:

На основании анализа результатов исследований выбрать оптимальный режим наплавки и с его применением определить коэффициент наплавки, обеспечиваемый изготовленной проволокой;

8. Сделать выводы по работе.

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по работе оформляется в соответствии с установленными требованиями и должен содержать:

- цель и задачи работы;
- теоретическую часть;
- таблицу с результатами исследования сварочно-технологических свойств композиционной или порошковой проволоки и рисунки характерных валиков наплавленного металла с показом дефектов его качества;

## Результаты исследований

Сварочный ток, А	Напряжение на дуге, В	Скорость сварки, м/ч	Оценка исследованных параметров

- выводы по работе, представляют не в форме аннотации, а в виде логически вытекающих из результатов работы положений, касающихся технологичности изготовления композиционной или порошковой проволоки.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы преимущества и недостатки порошковых проволок в сравнении с проволоками сплошного сечения или композиционными?
2. Каким требованиям должна отвечать наплавочная проволока?
3. Каковы особенности плавления порошковых проволок?
4. Как улучшить устойчивость дуги при наплавке порошковой проволокой?
5. Как улучшить формирование наплавленного металла при наплавке проволокой?
6. В зависимости от чего и как определяет диаметр калибрующей части волюки при формовке проволоки?
7. Как экспериментально проверить коэффициент заполнения проволоки шихтой?

## 8. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Пацекин В.П., Рахимов К. 3. Производство порошковой проволоки. – М.: Металлургия. – 1979. – 80 с.
2. Походня, И.К. Производство порошковой проволоки / И. К. Походня, В. Ф. Альтер, В. Н. Шлепаков. – Киев: Высшая школа. – 1980.–30 с.
3. Порошковая проволока для наплавки сплава на основе алюминид никеля Ni<sub>3</sub>Al / С. Н. Цурихин, Г. Н. Соколов, И. В. Зорин и др. // Сварочное производство. – № 1. – 2006. – С. 17 – 22.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Неровный, В. М.* Теория сварочных процессов: учебник для вузов / А. В. Коновалов и [др.]; под ред. В. М. Неровного. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 752 с.
2. *Потапов, Н. Н.* Сварочные материалы для дуговой сварки : справ. пособие: В 2 т. / Д. Н. Баранов, О. С. Каковкин; под ред. Н. Н. Потапова – М.: Машиностроение, Т. 2: Сварочные проволоки и электроды. – 1993. – 766 с.
3. Технология сварки плавлением и термической резки металлов [Текст]: учеб. пособие / под ред. В. А. Фролова - Москва : Альфа-М, 2013. - 445 с.
4. *Макаров, Э. Л.* Теория свариваемости сталей и сплавов / Э. Л. Макаров, Б. Ф. Якушин; под ред. Э. Л. Макарова. – М.: Изд – во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 487 с.
5. *Шлепаков, В. Н.* Современное состояние разработки и применения порошковых проволок для сварки углеродистых и низколегированных сталей / В. Н. Шлепаков, Ю. А. Гаврилюк, А. С. Котельчук // Автоматическая сварка. – 2010. – № 2. – С. 46-51.
6. *Блехерова, Н. Г.* Автоматическая сварка самозащитной порошковой проволокой. Преимущества процесса / Н. Г. Блехерова, В. В. Прохоров, П. В. Пискорский, Н. В. Глушак // Территория НЕФТЕГАЗ. – 2012. – № 6. – С. 94-95.
7. *Макиенко, В. М.* Повышение хладостойкости аустенитной стали при восстановлении изношенных поверхностей электродуговой наплавкой порошковыми проволоками / В. М. Макиенко, Е. М. Баранов, Д. В. Строителев, И. О. Романов // Сварочное производство. – 2008. – № 6. – С. 17-19.
8. Влияние компонентов шлаковой системы порошковых проволок на технологичность процесса наплавки и механические свойства наплавленного металла / В. М. Макиенко, Д. В. Строителев, Е. М. Баранов [и др.] // Сварочное производство. – 2006. – № 10. – С. 7-10.
9. *Рябцев, И. А.* Электродные материалы для механизированных способов дуговой наплавки // Автоматическая сварка. – 2005. – № 8. – С. 55-59.
10. *Мойсов, Л. П.* Метод прогнозирования технологических возможностей порошковых проволок / Л. П. Мойсов // Сварочное производство. – 2005. – № 8. – С. 26-29.
11. *Соколов, Г. Н.* Наплавка износостойких сплавов на прессовые штампы и инструмент для горячего деформирования сталей: монография / Г. Н. Соколов, В. И. Лысак; ВолгГТУ. – Волгоград, 2005. – 284 с.
12. *Походня, И. К.* Металлургия дуговой сварки. Взаимодействие металла с газами / НАН Украины ; Институт электросварки им. Е. О. Патона / под ред. И. К. Походни. – Киев. : Наукова думка, 2004. – 442 с.