



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ДГТУ)

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к курсовой работе по дисциплине  
«Теория сварочных процессов»,  
направление 15.03.01 Машиностроение

Ростов–на–Дону, 2022

## 1. Цель и задачи курсовой работы

Практическое использование и закрепление теоретических знаний по курсу.

Развитие и совершенствование навыков самостоятельной работы со специальной литературой и нормативно-технической документацией (НДТ) при разработке технологии дуговой сварки сталей.

## 2. Тематика и объем работы

Курсовая работа носит сугубо индивидуальный характер. Общими её разделами являются:

- задание на курсовую работу;
- характеристика основного металла;
- выбор сварочных материалов;
- выбор типа соединения;
- выбор (или расчет) режима сварки;
- выбор расчетной схемы тепловых процессов;
- расчет и построение графика распределения максимальных температур в поперечном сечении сварного соединения;
- расчет и построение термических циклов сварки для заданных точек сварного соединения;
- расчет температуры нагрева электрода протекающим по нему током;
- расчет производительности процессов наплавки и проплавления;
- расчет параметров сварочной ванны и сварного шва;
- определение содержания легирующих элементов в металле шва;
- определение структуры металла шва;
- анализ свариваемости основного металла, структурных превращений в ЗТВ;
- список использованной литературы.

Курсовая работа оформляется в виде расчетно-пояснительной записки на листах формата А4 согласно требованиям ГОСТ 2.105-79.

## 3. Характеристика основного металла

Из стандарта на заданную марку стали (он указывается в задании) или из марочников сталей (например, [1, 2]) необходимо выписать химический состав данной стали и её механические свойства. Указать область применения заданной стали, её структурный класс.

#### 4. Выбор сварочных материалов

При разработке технологии сварки стремятся обеспечить идентичность эксплуатационных свойств сварного соединения свойствам основного металла. Если это касается конструкционных сталей, то при сварке необходимо обеспечить равнопрочность сварного соединения основному металлу. Поэтому при ручной дуговой сварке (РДС) покрытыми электродами тип электрода выбирают в соответствии с пределом прочности металла на разрыв (временное сопротивление  $\sigma_B$ ). Например, сталь 10Г2С1 имеет предел прочности  $\sigma_B = 490$  МПа. Поэтому равнопрочность сварного соединения могут обеспечить электроды типа Э50 или Э50А. Так как для сварки низколегированных сталей применяют сварку на постоянном токе обратной полярности, то из электродов, относящихся к типу Э50А, можно применить электроды марок УОНИ-13/55, ТМУ-21У, ИТС-4С и др. Выбор марок электродов осуществляется по соответствующим каталогам [3, 4, 5].

Для теплоустойчивых, высоколегированных сталей и для наплавки тип электродов означает гарантированный химический состав наплавленного металла. Для этих сталей при сварке, как правило, необходимо обеспечить идентичность химического состава металла шва основному металлу. Этим и определяется выбор типа электрода для данных сталей.

Выбрав марку электрода, необходимо выписать его основные паспортные данные: тип электрода, область применения, значения коэффициентов наплавки и потерь, типичный химический состав металла шва и его механические свойства.

Выбор сварочных материалов для сварки в защитных газах и под флюсом лучше сделать в соответствии с литературой [6, 7, 8], где даны рекомендации по использованию сварочных материалов при сварке конкретной группы сталей. В этом случае надо выписать химический состав электродной проволоки из ГОСТ 2246.

Состав флюса, его характеристика, область применения указаны в работе [9].

#### 5. Выбор типа соединения

Выбор типа соединения осуществляется в соответствии со стандартами на конструктивные элементы сварных соединений для заданного способа сварки (например, [10, 11, 12]). Для выбранного типа

соединения необходимо указать на рисунке размеры, соответствующие подготовке деталей к сварке, и габариты сварного шва. В соответствии с этими размерами рассчитать требуемую площадь наплавленного металла.

## 6. Выбор расчетной схемы тепловых процессов

Выбор расчетной схемы тепловых процессов следует ограничить быстросействующим мощным источником нагрева в случае наплавки валика или при сварке встык за один проход. Хотя эти схемы более приемлемы для автоматической сварки при  $V_{св} \geq 25$  м/ч, но их использование и для РДС при  $V_{св} \leq 18$  м/ч дает вполне приемлемые результаты, незначительно отличающиеся от схемы - сварка подвижным источником.

## 7. Выбор (или расчет) режимов сварки

### 7.1. Ручная дуговая сварка

Исходным параметром для выбора режима сварки плавлением является либо толщина свариваемых деталей  $\delta$  – для стыковых швов или катет углового шва  $K$  – для нахлесточных, тавровых и угловых соединений.

В общем случае выбрать диаметр электрода можно по следующей таблице

$\delta$ при сварке встык, мм	1.5-2.0	3	4-8	8-12	12-16	16 и >
$K$ угловых швов ( $K \approx 0.8\delta$ ), мм		3	4-5		6-8	$\leq 8$ за один проход
$d_э$ , мм	1.6-2.0	3	4	4-5	5	5-6

На выбор величины диаметра электрода влияют и требования нормативно-технической документации. Так, при сварке трубопроводов котельного оборудования из любой марки сталей диаметр электродов, применяемых для корневого шва, не должен превышать 3мм, последующие выполняются электродом диаметром не более 4мм.

При сварке данных трубопроводов из легированной стали (теплоустойчивой перлитного класса, мартенситного, мартенситно - фер-

ритного и аустенитного классов) диаметр электрода во избежание перегрева основного металла не должен превышать 3мм [13].

Величина тока при РДС для принятого диаметра электрода определяется по паспортным данным выбранной марки электрода. При отсутствии таких данных величину тока можно определить по одной из следующих формул:

$$I = 10 \cdot d_{\text{э}}^2 \dots \quad (1)$$

$$I = (20 + 6d_{\text{э}})d_{\text{э}} \dots \quad (2)$$

$$I = 5d_{\text{э}}(d_{\text{э}} + 3)\dots \quad (3)$$

где  $d_{\text{э}}$  – в мм.

Затем можно проверить, обеспечивает ли данный ток требуемую глубину проплавления «а»:

$$a = b \cdot I \dots \quad (4)$$

где  $b = \left(\frac{1}{80} \div \frac{1}{100}\right)$ , мм/А;

при наплавке валика и  $b = \left(\frac{1}{60} \div \frac{1}{75}\right)$  мм/А

при сварки в стык с обязательным зазором между свариваемыми деталями, равным  $\left(\frac{1}{5} \div \frac{1}{6}\right)\delta$ .

Величина напряжения дуги при РДС не является нормативным параметром режима сварки, но она необходима при тепловых расчетах. При РДС сварка осуществляется на режимах, соответствующих жесткому участку статической вольт-амперной характеристики дуги (см.рис.1). В этих случаях напряжение дуги определяется уравнением:

$$U = a + b \cdot l \dots \quad (5)$$

где  $a = U_k + U_a$  - сумма катодного и анодного падения напряжений;

$b$  – градиент падения напряжения на единицу длины дуги, В/мм;

$l$  – длина дуги, мм.

Следовательно, при определенном способе сварки (или для данной марки электрода) напряжение дуги зависит лишь от её длины.

Однако для РДС в литературе дана зависимость напряжения дуги от тока в следующем виде:

$$U = 20 + 0.04 \cdot I \dots \quad (6);$$

Смысл этой зависимости виден из рис.1. При РДС сварщик выдерживает длину дуги равную диаметру электрода. Рассчитаем по уравнению (3) величину тока для электродов диаметром 3, 4, 5 и 6 мм. Для этих токов по уравнению (6) рассчитаем напряжение дуги. Результаты сведем в таблицу:

$dэ, \text{ мм}$	3	4	5	6
$I_д, \text{ А}$	90	140	200	270
$U_д, \text{ В}$	23.6	25.6	28	30.8

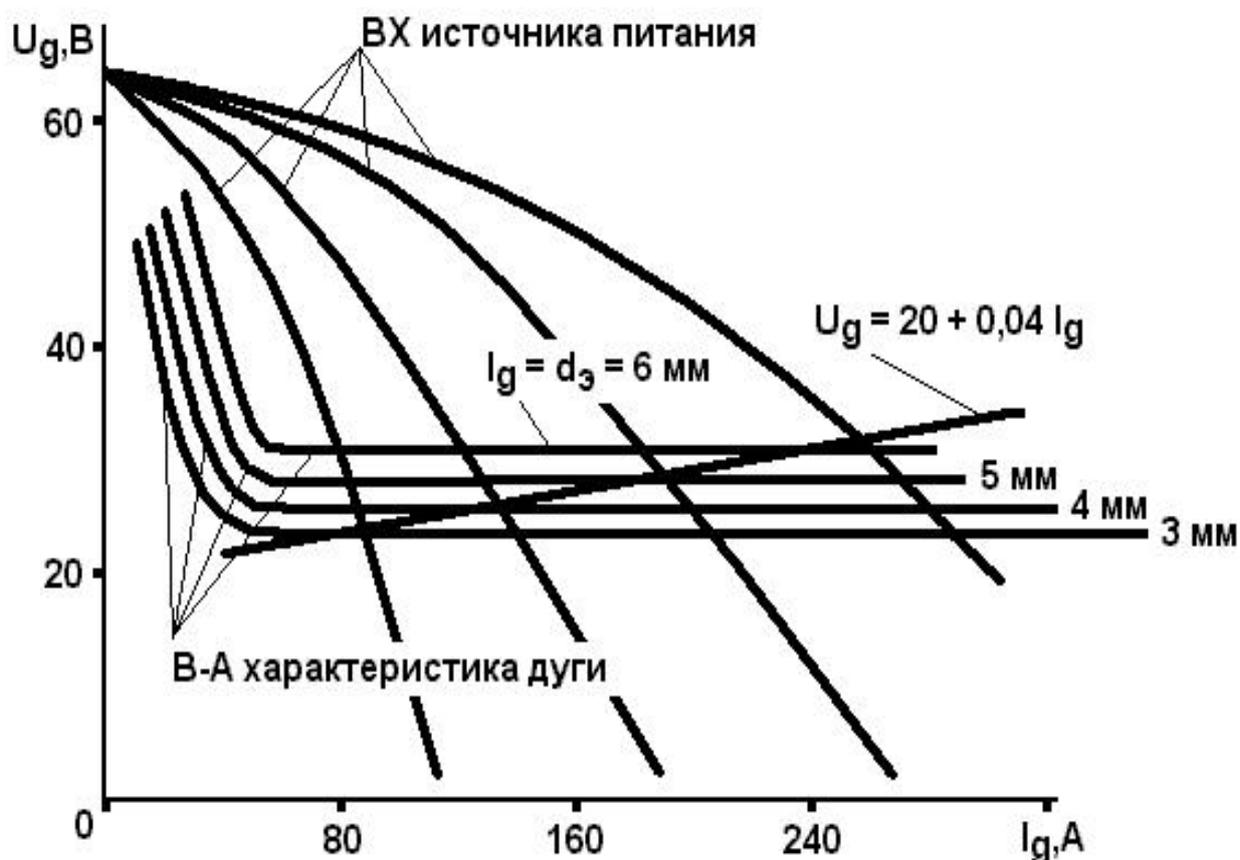


Рис.1. Геометрический смысл зависимости  $U = 20 + 0.04 \cdot I$

Эти режимы соответствуют пересечению вольтамперных (В-А) характеристик дуги с внешними характеристиками (ВХ) источника питания. Тогда зависимость  $U_д = 20 + 0.04 \cdot I_д$  будет представлять совокупность режимов РДС для разных диаметров электродов при длине дуги равной диаметру электрода.

При РДС скорость сварки лежит в пределах от 4 до 18 м/ч, но чаще  $V_{св} = (6 \div 12)$  м/ч. Лишь при сварке ниточным швом сверху

вниз электродами с целлюлозным покрытием скорость сварки  $V_{св} \leq 36$  м/ч. Если в задании скорость сварки не указана, то её можно определить следующим образом. Установлено, что площадь наплавки первого прохода составляет

$$F_{H_1} = (6 \div 8)d_{э}, \text{ (мм}^2\text{)} \dots \quad (7)$$

где  $d_{э}$  в мм.

Площадь наплавки последующих проходов составляет

$$F_{H_2} = (8 \div 12)d_{э} \dots \quad (8)$$

Задавшись площадью наплавки по уравнению (7) или (8), можно определить требуемую при этом скорость сварки из уравнения (9)

$$V_{св} = \frac{\alpha_n \cdot I}{3600\gamma \cdot F_n}, \text{ (см/с)} \dots \quad (9)$$

где  $\alpha_n$  – коэффициент наплавки, определяемый из паспортных данных на выбранную марку электрода, г/А·ч;

$\gamma$  – плотность (удельный вес) металла, г/см<sup>3</sup>;

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

Можно вычислить необходимое число проходов:

$$n = \frac{F_n - F_{H_1}}{F_{H_2}} + 1 \dots \quad (10)$$

где  $F_n$  – требуемая по чертежу площадь наплавки, см<sup>2</sup>;

$F_{H_1}$  – площадь наплавки при первом проходе, см<sup>2</sup>;

$F_{H_2}$  – площадь наплавки при последующих проходах, см<sup>2</sup>.

## 7.2. Сварка в углекислом газе

При сварке в углекислом газе газовая фаза носит резко окислительный характер. Получение плотных швов, равнопрочных основному металлу, осуществляется за счет применения более легированной проволоки, чем основной металл.

Плотность тока при сварке в CO<sub>2</sub> лежит в пределах  $i = (50 \div 400)$  А/мм<sup>2</sup>. Различают два диапазона режимов сварки: сварку на нормальных и форсированных режимах. По данным кафедры сварки ДГТУ величина тока при сварке на нормальных режимах составляет  $I_{нор} = (100 \div 200)d_{э}$ , где  $d_{э}$  в мм.

Более точно

$$I_{нор} = 8955 \cdot d_{\text{Э}}^2, \text{ А ...} \quad (11)$$

где  $d_{\text{Э}}$  в см.

Это соответствует плотности тока  $i = 115 \text{ А/мм}^2$ .

При сварке на форсированных режимах  $I_{фор} = (250 \div 300)d_{\text{Э}}$ , более точно  $I_{фор} = 4359 \cdot d_{\text{Э}}^{1.25}$ , А ... (12); где  $d_{\text{Э}}$  в см.

При этом  $i = (185 \div 320)$ , А/мм<sup>2</sup>.

Необходимую величину диаметра электрода  $d_{\text{Э}}$  в зависимости от толщины  $\delta$  свариваемых деталей определяют по следующей таблице:

$\delta$ , мм	0.8-2.0	3-6	8-14	16-20	22-40
$d_{\text{Э}}$ , мм	0.8-1.2	1.2-1.6	1.2-2.0	1.6-3.0	1.6-4.0

При полуавтоматической сварке  $d_{\text{Э}} \leq 2$  мм. Требуемый ток для получения заданных катета шва  $K$  или глубины проплавления металла  $h_{пр}$  определяется при сварке сталей по следующим уравнениям:

$$I = \frac{100 \cdot K}{1.75 - 0.15 \cdot d_{\text{Э}}}, \text{ А ...} \quad (13)$$

и

$$I = \frac{75 \cdot h_{пр}}{1.75 - 0.15 \cdot d_{\text{Э}}}, \text{ А ...} \quad (14)$$

где  $K$ ,  $h_{пр}$  и  $d_{\text{Э}}$  в мм.

Возможно определение величины тока для обеспечения расчетной глубины проплавления « $a$ » по уравнению:

$$I = \frac{a}{K_a}, \dots \quad (15)$$

где  $a = (0.7 \div 0.8)\delta$ , (мм) при односторонней сварке и  $a = 0.6 \cdot \delta$  или  $a = 0.5 \cdot \delta + (2 \div 3)$  мм при двухсторонней сварке деталей толщиной  $\delta$ .

Значения коэффициента  $K_a$ :

$d_{\text{Э}}$ , мм	1.2	1.4	1.6	2.0	3.0	4.0	5.0
$K_a$ , мм/100А	2.1	2.0	1.75	1.55	1.45	1.35	1.2

Напряжение дуги при сварке в  $\text{CO}_2$  определяется уравнением:

$$U_{\delta} = (14 + 0.05 \cdot I_{\delta}) \pm 1, \text{ В ...} \quad (16)$$

Регулировка величины тока осуществляется за счет скорости подачи проволоки  $V_{\text{пн}}$ , а величины напряжения дуги – за счет изменения напряжения источника питания. Скорость подачи электрода по данным Е.Н. Варуха (ДГТУ) можно рассчитывать по уравнению:

$$V_{\text{пн}} = 4.41 \cdot 10^{-10} \cdot d_{\text{э}}^{-2} \cdot I + 1.78 \cdot 10^{-16} \cdot I^2 \cdot d_{\text{э}}^{-3} + 1.08 \cdot 10^{-16} \cdot I^2 \cdot l_{\text{г}} \cdot d_{\text{э}}^{-4} - 9.3 \cdot 10^{-7} \cdot d_{\text{э}}^{-2}, \text{ м/с ...} \quad (17)$$

где  $d_{\text{э}}, l_{\text{г}}$  – в м.

Величина вылета электрода  $l_{\text{г}}$  – это расстояние от конца мундштука до изделия. Обычно  $l_{\text{г}} = 10d_{\text{э}}$ , более точно его величина, а также расход углекислого газа  $Q_{\text{CO}_2}$  приведены в следующей таблице:

$d_{\text{э}}, \text{ мм}$	0.5-0.8	1.0-1.4	1.6-2.0	2.5-3.0
$l_{\text{г}}, \text{ мм}$	7-10	8-14	12-18	18-22
$Q_{\text{CO}_2}, \text{ л/мин}$	5-8	8-15	15-20	20-30

Расстояние от сопла горелки до изделия обычно  $(8 \div 15) \text{ мм}$ .

При автоматической сварке удовлетворительное формирование шва наблюдается, если  $I \cdot V_{\text{св}} = A, (A \cdot \text{м/ч})$  имеет следующее значение:

$d_{\text{э}}, \text{ мм}$	1.2	1.6	2.0	3.0	4.0	5.0
$A \cdot 10^3, \text{ А} \cdot \text{м/ч}$	2 ÷ 5	5 ÷ 8	8 ÷ 12	12 ÷ 16	16 ÷ 20	20 ÷ 25

Следовательно, приняв какое-то значение  $A$  для заданного диаметра электрода  $d_{\text{э}}$ , найдем скорость сварки:

$$V_{\text{св}} = \frac{A}{I}, (\text{м/ч}) \dots \quad (18)$$

### 7.3. Сварка под флюсом

Режимы при сварке под флюсом лучше выбирать по справочной литературе [7, 14, 15, 16, 17].

При сварке встык за один проход толщин  $\delta \leq 12 \text{ мм}$  режимы сварки можно рассчитать по следующим уравнениям:

$$d_{\text{э}} = 0.4 + 0.6 \cdot \delta - 0.0321(\delta - 2)^2 + 5 \cdot 10^{-4}(\delta - 2)^3, \text{ мм ...} \quad (19)$$

$$I_{\text{св}} = 5 + 110.6 \cdot \delta - 6.99(\delta - 2)^2 + 0.1786(\delta - 2)^3, \text{ А ...} \quad (20)$$

$$V_{св} = (0.023 - \delta \cdot 10^{-4} + \delta^2 \cdot 10^{-4})^{-1}, \text{ м/ч ...} \quad (21)$$

В уравнениях (19), (20), (21) -  $\delta$  в мм.

$$U_{\delta} = (20 + 5 \cdot 10^{-2} \cdot d_{\delta}^{-0.5} \cdot I_{\delta}) \pm 1, \text{ В ...} (22);$$

В других случаях диаметр электрода определяется из таблицы:

$\delta$ , мм	$\leq 5$	$5 \div 30$	$> 30$
$d_{\delta}$ , мм	$1,6 \div 3,0$	$2,0 \div 5,0$	$5 \div 6$

При полуавтоматической сварке  $d_{\delta} = (1,6 \div 2,0)$  мм.

Далее величину тока определяют по уравнению (15), скорость сварки по уравнению (18), напряжение дуги по уравнению (22). Вылет электрода -  $l_{\delta} = 10 d_{\delta}$ .

При сварке высоколегированных сталей независимо от способа сварки величина тока должна быть на  $(10 \div 30)\%$  меньше, чем при сварке углеродистых сталей.

#### 8. Расчет распределения максимальных температур в поперечном сечении сварного соединения

Расчет максимальной температуры в поперечном сечении сварного соединения производится по уравнению (23) для наплавки валика на массивное тело и по уравнению (24) для сварки встык за один проход.

$$T_{\max}(r) = \frac{0.234 \cdot q_u}{V \cdot C \cdot \gamma \cdot r^2} \dots \quad (23)$$

$$T_{\max}(y) = \frac{0.242 \cdot q_u}{V \cdot C \cdot \gamma \cdot \delta \cdot y} \dots \quad (24)$$

где

$q_u$  - эффективная тепловая мощность нагрева изделия, определяется по уравнению

$$q_u = I \cdot U \cdot \eta_u \dots \quad (25)$$

$\eta_u$  - эффективный к.п.д. нагрева изделия, определяемый по таблице 1;

$C \cdot \gamma$  - объемная теплоемкость, Дж/см<sup>3</sup> · с;

$r$  и  $y$  - расстояние от оси шва до интересующей нас точки, см.

Таблица 1

Значения  $\eta_u$  для различных способов сварки

Способ сварки	$\eta_u, \%$
Угловая дуга	50-60
Вольфрамовым электродом	50-60
РДС	65-85
Под флюсом	80-96
В углекислом газе	80-84
Порошковой проволокой	80-86

Таблица 2

Значения теплофизических величин,  
принимаемые при тепловых расчетах

Материал	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Дж/см·с·°С	Объемная теплоемкость $C\gamma$ , Дж/см <sup>3</sup> ·°С	Коэффициент температуропроводности $a$ , см <sup>2</sup> /с
Углеродистые и НЛ стали	0,375-0,417	4,79-5,21	0,08
ВЛ стали	0,25	4,71	0,053

Для принятых режимов сварки  $q_u, V$  – константные величины, поэтому уравнения (23) и (24) можно привести к виду:

$$T_{\max}(r) = \frac{K_1}{r^2}, \dots \quad (23')$$

$$T_{\max}(y) = \frac{K_2}{y^2}, \dots \quad (24')$$

где  $K_1 = \frac{0.234 \cdot q_u}{V \cdot C \cdot \gamma}$ ;  $K_2 = \frac{0.242 \cdot q_u}{V \cdot C \cdot \gamma \cdot \delta}$ .

По уравнениям (23') и (24') определить  $T_{\max}$  при начальном значении  $r(y)=0.2$ см до 2см с шагом 0.2см. Полученные значения внести в таблицу:

$r(y), \text{см}$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$T_{\max}, \text{°С}$										

По полученным значениям построить графики  $T_{max} = f(r)$  или  $T_{max} = f(y)$ . Уравнения (23) и (24) определяют распространение тепла в следствие теплопроводности в твердых телах, поэтому значения  $T_{max} > T_{nl}$  во внимание не принимать. Графики строить начиная с точек, имеющих  $T_{max} \leq T_{nl}$ .

### 9. Расчет термических циклов точек, находящихся в ЗТВ

Данные точки задаются преподавателем. Как правило, они находятся на расстоянии  $1 \div 8$  мм от линии сплавления, но не от оси шва (хотя в расчетных формулах расстояние соответствует координате от оси шва).

Расчет ведется по уравнению (25) для наплавки валика и по уравнению (26) для сварки встык за один проход.

$$T(r, t) = \frac{q_u}{2\pi\lambda Vt} \cdot e^{-\frac{r^2}{4at}}, \dots \quad (25)$$

$$T(y, t) = \frac{q_u}{VC\gamma\delta\sqrt{4\pi at}} \cdot e^{-\frac{y^2}{4at}}, \dots \quad (26)$$

где  $t$  – время (с), прошедшее с того момента, когда дуга пересекла плоскость, в которой находится наша точка.

Уравнения приводятся к виду:

$$T(r, t) = \frac{K_3}{t} \cdot e^{-\frac{r^2}{K_4 \cdot t}}, \dots \quad (25')$$

$$T(y, t) = \frac{K_5}{\sqrt{t}} \cdot e^{-\frac{y^2}{K_6 \cdot t}}, \dots \quad (26')$$

Для конкретных значений  $r$  или  $y$  уравнения (25') и (26') имеют лишь одну переменную величину  $t$ . Задавшись значениями  $r(y)$  и приняв величину  $t$  в соответствии с таблицей, вычисляем искомую температуру. Результаты сведем в таблицу:

$T, c$		0,5	1	2	5	10	20	40	60	80	100
$T, ^\circ C$ для точек	$r_1(y_1) =$										
	$r_2(y_2) =$										

	$r_3(y_3) =$									
--	--------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

При построении графика  $T=f(t)$  обязательно надо знать экстремальные значения температуры. Они рассчитываются по уравнениям (23) и (24), а время достижения максимальных температур определяется по уравнениям (27) и (28):

$$t_m = \frac{r^2}{4a}, \dots \quad (27)$$

$$t_m = \frac{y^2}{2a}, \dots \quad (28)$$

Графики термического цикла и распределения максимальных температур строятся на миллиметровке.

#### 10. Расчет основных параметров сварочной ванны и сварного шва

При наплавке валика время существования сварочной ванны определяется уравнением (29), длина ванны уравнением (30), ширина ванны (и сварного шва) уравнением (31):

$$t_s = \frac{q_u}{2\pi\lambda VT_{nl}}, \dots \quad (29)$$

$$l_s = \frac{q_u}{2\pi\lambda T_{nl}}, \dots \quad (30)$$

$$e = \sqrt{\frac{0.936 \cdot q_u}{VC\gamma T_{nl}}}, \dots \quad (31)$$

где  $T_{nl}$  – температура плавления металла, °С.

При сварке встык за один проход эти параметры определяются уравнениями (32), (33), (34):

$$t_s = \frac{q_u^2}{4\pi\lambda C\gamma W^2 \delta^2 T_{nl}^2}, \dots \quad (32)$$

$$l = \frac{q_u^2}{4\pi\lambda C\gamma W \delta^2 T_{nl}^2}, \dots \quad (33)$$

$$e = \frac{0.484 \cdot q_u}{VC\gamma \delta T_{nl}}, \dots \quad (34)$$

Глубину проплавления металла « $a$ » можно определить по уравнению (4) для РДС и из уравнения (13) при сварке в  $CO_2$ .

Площадь наплавки рассчитывается по уравнению:

$$F_n = \frac{\lambda_n \cdot I}{3600 \cdot \gamma V_{св}}, \dots \quad (35)$$

Площадь проплавления определяется уравнением:

$$F_{np} = \frac{q_u}{V} \cdot \eta_t \cdot \frac{1}{S'_{nl}}, \dots \quad (36)$$

где  $S'_{nl}$  – теплосодержание единицы объема металла при температуре плавления, для сталей  $S'_{nl} = 10530$  Дж/см<sup>3</sup>.

$\eta_t$  – термический к.п.д. проплавления, определяемый в зависимости от критериев  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$ .

При наплавке валика величина  $\eta_t$  зависит от критерия  $\varepsilon_3$  и относительной глубины проплавления  $\frac{a}{e}$ .

Графически эти зависимости представлены на рис. 81 [18] и на рис. VI.4 [19], а в настоящем пособии на рис. 2.

Величина  $\varepsilon_3$  определяется уравнением (37):

$$\varepsilon_3 = \frac{q_u V}{a^2 S'_{nl}}, \dots \quad (37)$$

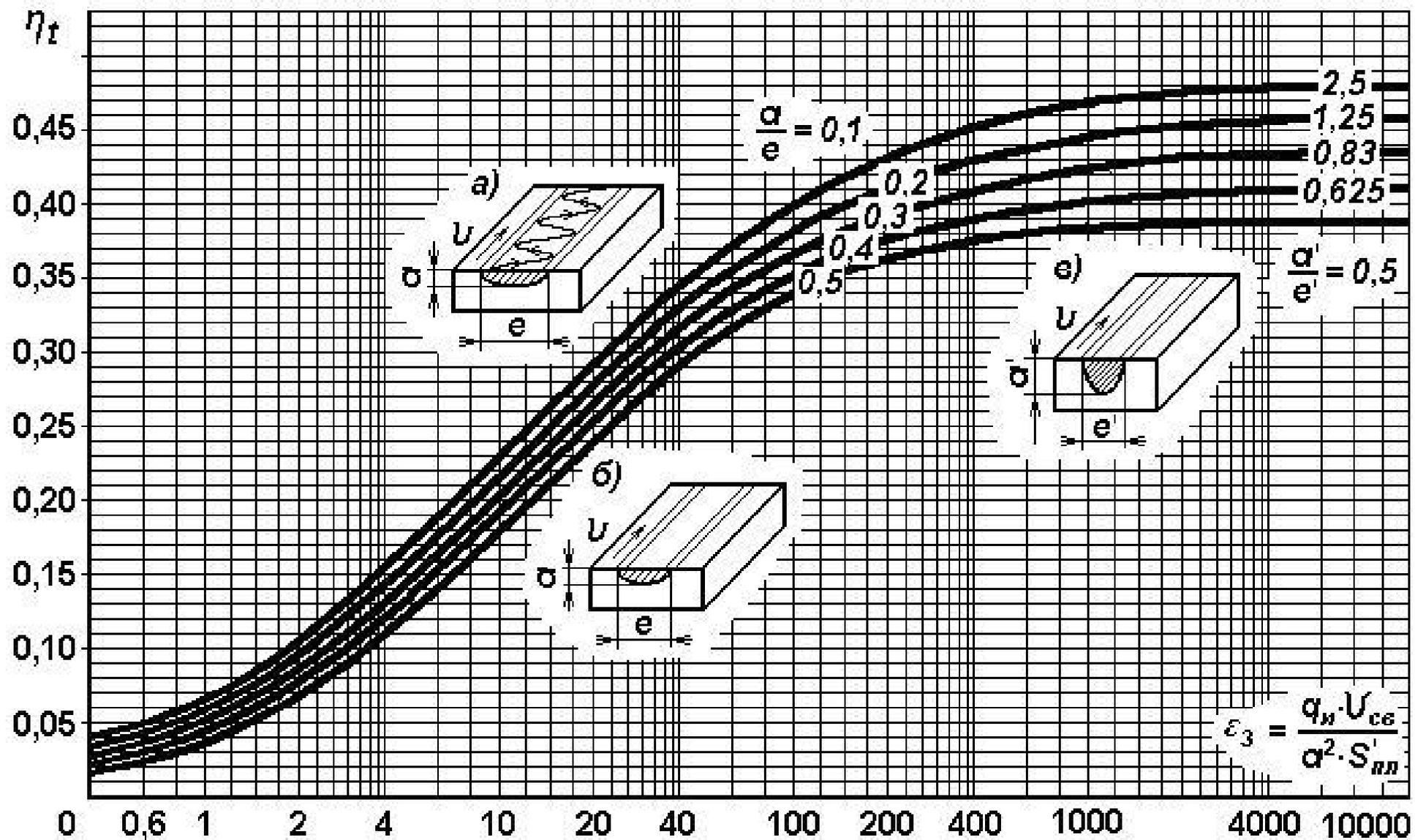


Рис. 2. График расчетных значений  $\eta_t$  при различной форме провара

При сварке встык за один проход величина  $\eta_t$  зависит лишь от критерия  $\varepsilon_2$ . Его величина определяется уравнением (38):

$$\varepsilon_2 = \frac{q_u}{a\delta S'_{nl}}, \dots \quad (38)$$

Графическая зависимость  $\eta_t$  от  $\varepsilon_2$  приведена на рис. 82 [18]. Но проще рассчитать в этом случае  $\eta_t$  по следующему уравнению:

$$\eta_t = \exp\left(-\frac{5.9494}{\exp \varepsilon_2} - \frac{1.6737}{\varepsilon_2} - 710.14 \cdot 10^{-3}\right), \dots \quad (39)$$

### 11. Определение основных параметров термического цикла сварки

К основным параметрам термического цикла сварки кроме максимальной температуры  $T_{max}$  относятся длительность нагрева металла  $t_n$  при температуре интенсивного роста аустенитного зерна и скорость охлаждения металла  $W$  при температуре минимальной устойчивости аустенита  $T_{min}$ .

Длительность нагрева  $t_n$  определяется уравнением (40) для наплавки валика и (41) для сварки встык:

$$t_n = f_3 \frac{\frac{q_u}{V}}{\lambda(T_{max} - T_0)}, \dots \quad (40);$$

$$t_n = f_2 \frac{\left(\frac{q_u}{V\delta}\right)^2}{\lambda C \gamma (T_{max} - T_0)^2}, \dots \quad (41);$$

где  $T_0$  – начальная температура изделия, °С;

$T_{max}$  – максимальная температура нагрева интересующей нас точки;

$f_2$  и  $f_3$  – функции, зависящие от критерия  $\theta_1$ .

$$\theta_1 = \frac{T - T_0}{T_{max} - T_0}, \dots \quad (42);$$

где

$T$  – температура, время пребывания  $t_n$  выше которой нас интересует.

Функции  $f_3$  и  $f_2$  определяются уравнениями:

$$f_3 = \frac{0.181}{\theta_1} - 0.144, \dots \quad (43);$$

$$f_2 = (13.4 \cdot \theta_1^2 - 0.089 \cdot \theta_1)^{-1}, \dots \quad (44);$$

Скорость охлаждения металла при температуре минимальной устойчивости аустенита  $T_{min}$  при наплавке валика на массивное тело ( $\delta \geq 25$ мм) определяется по уравнению (45), а при сварке встык за один проход ( $\delta \leq 25$ мм) по уравнению (46):

$$W = - \frac{2\pi\lambda(T_{min} - T_0)^2}{\frac{q_u}{V}}, \dots \quad (45);$$

$$W = - \frac{2\pi\lambda C\gamma(T_{min} - T_0)^3}{\left(\frac{q_u}{V\delta}\right)^2}, \dots \quad (46).$$

В остальных случаях ( $\delta = 10 \div 25$ мм) скорость охлаждения рассчитывается по уравнению (47):

$$W = - \frac{\vartheta}{\theta} \cdot \frac{2\pi\lambda(T_{min} - T_0)^2}{\frac{q_u}{V}}, \dots \quad (47);$$

где

$$\frac{\vartheta}{\theta} = 0.145 + \exp\left[-\left(\frac{1}{\theta} - 0.39\right)\right], \dots \quad (48).$$

Величина  $\frac{1}{\theta}$  определяется по уравнению (49), причем величины  $\frac{q_u}{V}$  и  $\delta$  подставляются с коэффициентами приведения, указанными в таблице 3.

$$\frac{1}{\theta} = \frac{2 \frac{q_u}{V}}{\pi\delta^2 c\gamma(T_{min} - T_0)}; \quad (49)$$

Таблица 3

Вид соединения	Встык с V-образной разделкой 60° – 1й шов	Нахлесточное, тавровое – 2й шов	Крестовое – 4й шов
$\frac{q_u}{V}$	1.5	0.67	0.5
$\delta$	1.5	1	1

Если  $\frac{1}{\theta} \leq 0.4$ , то  $\frac{g}{\theta} = 1$ .

Когда рассчитанная скорость охлаждения превышает допустимую, необходим подогрев изделия перед сваркой. Температуру подогрева можно определить из уравнений (45) или (46), приняв  $W=W_{онт}$ , либо исходя из эквивалента углерода.

$$T_{под} = 550 \cdot \sqrt{C'_{эkv} - 0.45}, \text{ } ^\circ\text{C} \dots (50).$$

В любом случае  $T_{под} \leq 450^\circ\text{C}$ .

$$C'_{эkv} = C_{эkv} (1 + 0.05\delta), \text{ } \% \dots (51);$$

где  $\delta$  – толщина свариваемого металла, см.

$$C_{эkv} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{10} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + 5B, \text{ } \% \dots (52);$$

где химические символы обозначают содержание данного элемента в сплаве.

## 12. Расчет нагрева электрода протекающим по нему током

При РДС порядок расчета температуры нагрева протекающим током  $T_T$  следующий:

1. Определяем плотность тока в электроде

$$j = \frac{4I}{\pi d_s^2}, \text{ } (\text{A}/\text{мм}^2)$$

2. Из таблицы 4 выписываем величины  $m$ ,  $A$ ,  $D_1$

Таблица 4

Способ сварки	Род тока	$m$ , (мм <sup>3</sup> ·°C)/A <sup>2</sup>	$A$ , (мм <sup>2</sup> ·°C)/(A <sup>2</sup> ·C)	$D_1$ , °C
РДС	постоянный	2.5	0.024	200
	переменный	2.5	0.027	240
Под флюсом	постоянный	2.65	0.031	240

3. Из уравнения (53) находим  $T_{np}$ :

$$T_{np} = md_9 \cdot j^2 + T_0, \dots \quad (53);$$

где  $T_0$  – начальная температура электрода, °С.

4. Из уравнения (54) находим  $n$ :

$$n = \frac{A}{md_9} \left( \frac{T_{np}}{D_1} + 1 \right), \dots \quad (54).$$

5. Обозначим величиной  $B$  отношение (55):

$$B = \frac{D_1 + T_0}{T_{np} - T_0}, \dots \quad (55).$$

6. Определяем искомую величину  $T_T$ :

$$T_T = \frac{B \cdot e^{nt} \cdot T_{np} - D_1}{B \cdot e^{nt} + 1}, \dots \quad (56).$$

При автоматической сварке ( $j > 50$  А/мм<sup>2</sup>) расчет ведется по следующему уравнению:

$$T_T = (D_1 + T_0)e^{nt} - D_1, \dots \quad (57);$$

где

$$n = \frac{A \cdot j^2}{D_1}, \dots \quad (58);$$

а

$$t = \frac{l_6}{V_{np}}, \dots \quad (59).$$

### 13. Расчет содержания легирующих элементов в металле шва

Ожидаемое содержание любого легирующего элемента в металле шва можно рассчитать по следующим уравнениям:

$$[Le]_{шв} = \gamma \cdot [Le]_{o.m} + (1 - \gamma) \cdot [Le]_{np} \cdot K_{np}, \dots \quad (60);$$

$$[Le]_{шв} = \gamma \cdot [Le]_{o.m} + (1 - \gamma) \cdot [Le]_{np} \cdot K_{np} + (1 - \gamma) \cdot g_0 \cdot [Le]_{Fe-сн} \cdot P \cdot K_{покр}, \dots (61),$$

где

$\gamma$  – доля участия основного металла в металле шва, определяемая через соотношение площадей наплавки  $F_n$  и проплавления  $F_{np}$ ;

$$\gamma = \frac{F_{np}}{F_n + F_{np}} = \frac{F_{np}}{F_{шв}}, \dots \quad (62);$$

$[Le]_{шв}$ ,  $[Le]_{о.м}$ ,  $[Le]_{пр}$ ,  $[Le]_{Fe-сн}$  – содержание искомого легирующего элемента в металле шва, основном металле, проволоке, ферросплаве, %;

$K_{пр}$ ,  $K_{покр}$  – коэффициенты перехода легирующих элементов из проволоки и электродного покрытия;

$P$  – количество ферросплава в составе электродного покрытия (в долях);

$g_o$  – относительный вес электродного покрытия.

Формула (60) приемлема при сварке в защитных газах, газовой сварке, её можно применять и при сварке под пассивными флюсами.

Формула (61) справедлива для ручной дуговой сварке покрытыми электродами. В последнем случае, если известен по паспортным данным на принятую марку электрода химсостав наплавленного металла, расчет содержания легирующих элементов в металле шва можно выполнить по уравнению (63):

$$[Le]_{шв} = \gamma \cdot [Le]_{о.м} + (1 - \gamma) \cdot [Le]_{н.м}, \dots \quad (63);$$

где  $[Le]_{н.м}$  – гарантированное содержание элемента в наплавленном металле для данной марки электрода, %.

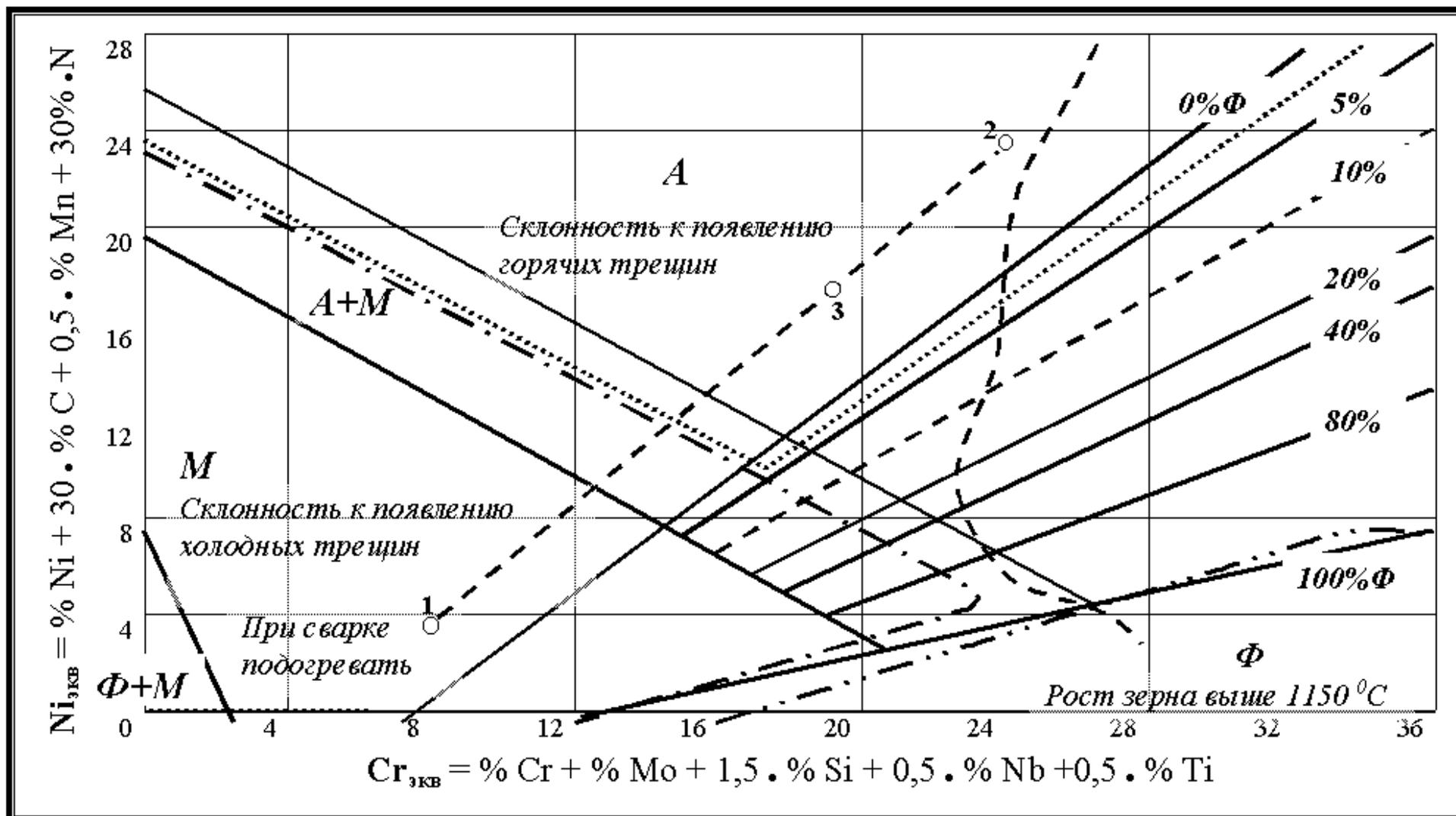
При анализе степени активности легирующего элемента и характера металлургических процессов, протекающих в зоне плавления, пользуются понятием коэффициента усвоения элемента. Этот коэффициент определяется отношением действительного содержания легирующего элемента в металле шва, определяемого химическим или спектральным анализом, к исходному:

$$K_{усв} = \frac{[Le]_{шв}}{[Le]_{исх}}, \dots \quad (64).$$

Исходное содержание легирующего элемента можно рассчитать по уравнениям (60), (61), приняв коэффициенты перехода равными единице.

#### 14. Определение ожидаемой структуры металла шва

При сварке легированных сталей важное значение для эксплуатационных свойств сварной конструкции имеет обеспечение определенной структуры металла шва. Так для придания жаропрочным аустенитным сталям высокой стойкости против образования горячих трещин нужно иметь в аустенитном шве 2÷3 (max5)% первичного феррита.



**Рис. 3. Структура металла шва сталей в зависимости от эквивалента хрома и никеля**

Повышение стойкости аустенитных сталей против межкристаллической коррозии обеспечивается увеличением ферритной фазы до (15÷25) %.

По химсоставу основного металла определяем эквивалент  $Cr$  и  $Ni$  (см рис.3). На структурной диаграмме Шеффлера допустим это будет соответствовать точке 1. Аналогично определим эквивалент  $Cr$  и  $Ni$  для сварочной проволоки. Пусть это будет точка 2 на диаграмме Шеффлера. Прямая, соединяющая точки 1 и 2, характеризует структурное состояние всех промежуточных сплавов, которые могут создаваться при смешивании основного и присадочного металла в зависимости от режима сварки, т.е. доли участия основного металла в металле шва  $\gamma$ . Чем больше величина коэффициента  $\gamma$ , тем больше в металле шва свариваемой стали, тем ближе металл шва по прямой 2-1 к точке 1. Если же, например,  $\gamma = 0,3$ , то структурное состояние металла шва будет соответствовать точке 3, находящейся на прямой 2-1, на расстоянии 0,3 отрезка 2-1 от точки 2.

#### 15. Свариваемость сталей

Свариваемость – это свойство металла или сочетания металлов образовывать при установленной технологии сварки соединение, отвечающее требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия. При сварке однородных материалов анализируется технологическая свариваемость основного металла.

Технологическая свариваемость металлов – это их отношение к совокупности физико-химических процессов, определяющих возможность получения сварного соединения без дефектов с требуемыми механическими и специальными свойствами.

При рассмотрении свариваемости конкретного металла анализируют следующие вопросы:

- какие дефекты возникают при сварке данного материала?
- какие причины их появления?
- какие меры надо принять для предотвращения образования этих дефектов?

Свариваемость различных сталей приведена в работах [8, 18, 19], в меньшей степени в работах [6, 7].

Анализируя свариваемость углеродистых и низколегированных сталей, обязательно проверяют по косвенным признакам по-

тенциальную склонность данных сталей к образованию холодных трещин по уравнению (52).

Если  $C_{экв} > 0.25\%$ , то сталь склонна к закалке; если  $C_{экв} > 0.45\%$ , то холодные трещины очень вероятны.

Склонность к образованию горячих трещин определяют по нескольким уравнениям (см. таблицу 5.).

Таблица 5

Показатели склонности к горячим трещинам

Наименование показателя	Параметрическое уравнение	Вид оценки	Область применения
Эквивалент углерода	$C_{экв}^* = C + 2S + \frac{P}{3} + \frac{(Si - 0,4)}{4} + \frac{Ni}{8} + \frac{(Mn - 0,8)}{8} + \frac{Cu}{10} + \frac{(Cr - 0,8)}{10}$	<0,35÷0,4 не склонен	Низкоуглер. и НЛ стали общего назначения
Фактор склонности	$HCS = \frac{C(S + P + 0,04Si + 0,01Ni) \cdot 10^3}{3Mn + Cr + Mo + V}$	<4 не склонен	Стали с $\sigma_B < 700$ МПа
		<2 не склонен	Стали с $\sigma_B > 700$ МПа
Единица склонности	$UCS = 230C + 190S + 75P + 45Nb - 12,3Si - 5,4Mn - 1$	<10 стойкий	Микролегированные с Nb
Критическая скорость деформирования, мм/мин	$V_{кр} = 19 - 42C - 411S - 3,3Si + 5,6Mn + 6,7Mo$	>6 стойкий <1,8 склонный	Легированные стали
Хромоникелевый эквивалент	$\frac{Cr_{\text{э}}}{Ni_{\text{э}}} = \frac{Cr + 1,37Mo + 1,5Si + 2Nb + 3Ti}{Ni + 0,31Mn + 22C + 14,2N + Cu}$	>1,5 не склонный <1,5 склонный	ВЛ стали аустенитного класса
Фактор склонности	$L = 299C + 8Ni + 142Nb - 5,5 \cdot (\% \delta Fe)^2 - 105$	L>0 склонный L<0 не склонный	Стали аустенитно-ферритного класса

Вычислив скорость охлаждения, можно по работе [20] определить ожидаемые механические свойства и структурный состав своей стали в ЗТВ. При отсутствии таких данных для своей низколегированной стали можно рассчитать эти показатели на ЭВМ в соответствии с программой, разработанной на кафедре сварки ДГТУ [21].

### **Задания на курсовую работу**

Задание выбирается по порядковому номеру в списке группы.

#### **Задание 1**

Способ сварки: Автоматическая в CO<sub>2</sub>  
Тип соединения: Стыковое  
Марка стали: Ст.3кп ГОСТ 380-94  
Толщина деталей, мм 10

#### **Задание 2**

Способ сварки: Автоматическая под слоем флюса  
Тип соединения: Стыковое  
Марка стали: 09X14H19B2БР ГОСТ 5632-72  
Толщина деталей, мм 16

#### **Задание 3**

Способ сварки: Автоматическая под слоем флюса  
Тип соединения: Стыковое  
Марка стали: Сталь 40 ГОСТ 1050-88  
Толщина деталей, мм 20

#### **Задание 4**

Способ сварки: Автоматическая под слоем флюса  
Тип соединения: Стыковое  
Марка стали: 25Г ГОСТ 4543-71  
Толщина деталей, мм 8

#### **Задание 5**

Способ сварки: Ручная дуговая покрытыми электродами  
Тип соединения: Стыковое  
Марка стали: 40Х ГОСТ 4543-71  
Толщина деталей, мм 5

### **Задание 6**

Способ сварки: Автоматическая в среде аргона  
Тип соединения: Стыковое  
Марка стали: 08X18H10T ГОСТ 5632-72  
Толщина деталей, мм 3

### **Задание 7**

Способ сварки: Автоматическая под слоем флюса  
Тип соединения: Стыковое  
Марка стали: 15X2НМФА-А ТУ108-765-78  
Толщина деталей, мм 25

### **Задание 8**

Способ сварки: Автоматическая под слоем флюса  
Тип соединения: Стыковое  
Марка стали: 35ХГСА ГОСТ 4543-71  
Толщина деталей, мм 5

### **Задание 9**

Способ сварки: Автоматическая под слоем флюса  
Тип соединения: Стыковое  
Марка стали: 40ХМФА ГОСТ 4543-71  
Толщина деталей, мм 16

### **Задание 10**

Способ сварки: Неплавящимся электродом в среде аргона  
Тип соединения: Стыковое одностороннее  
Марка стали: 35ХГСА ГОСТ 4543-71  
Толщина деталей, мм 8

### **Задание 11**

Способ сварки: Ручная аргонодуговая  
Тип соединения: Стыковое  
Марка стали: 12X18H10T ГОСТ 5632-72  
Толщина деталей, мм 5

### **Задание 12**

Способ сварки: Механизированная в CO<sub>2</sub>  
Тип соединения: Стыковое

Марка стали: 10ХСНД ГОСТ 19282-73  
Толщина деталей, мм 6

### **Задание 13**

Способ сварки: Автоматическая в CO<sub>2</sub>  
Тип соединения: Стыковое  
Марка стали: Сталь 15ХСНД ГОСТ 19281-89  
Толщина деталей, мм 5

### **Задание 14**

Способ сварки: Ручная дуговая  
Тип соединения: Стыковое  
Марка стали: Ст.5Гпс ГОСТ 380-94  
Толщина деталей, мм 6

### **Задание 15**

Способ сварки: Двухсторонняя автоматическая под слоем флюса  
Тип соединения: Стыковое без разделки кромок  
Марка стали: Сталь 20К ГОСТ 5520-79  
Толщина деталей, мм 16

### **Задание 16**

Способ сварки: Автоматическая в CO<sub>2</sub>  
Тип соединения: Стыковое двухстороннее  
Марка стали: Сталь 18К ГОСТ 5520-79  
Толщина деталей, мм 8

### **Задание 17**

Способ сварки: Ручная дуговая покрытыми электродами  
Тип соединения: Стыковое двухстороннее  
Марка стали: 09Г2СД ГОСТ 19281-89  
Толщина деталей, мм 6

### **Задание 18**

Способ сварки: Механизированная в CO<sub>2</sub>  
Тип соединения: Стыковое  
Марка стали: 15ХМ ГОСТ 4543-71  
Толщина деталей, мм 8

### **Задание 19**

Способ сварки: Автоматическая в аргоне  
Тип соединения: Стыковое  
Марка стали: 30ХГСН2А ГОСТ 4543-71  
Толщина деталей, мм 3

### **Задание 20**

Способ сварки: Автоматическая под слоем флюса  
Тип соединения: Стыковое одностороннее  
Марка стали: 16ГС ГОСТ 19281-89  
Толщина деталей, мм 5

### **Задание 21**

Способ сварки: Автоматическая в CO<sub>2</sub>  
Тип соединения: Стыковое одностороннее  
Марка стали: 10Г2С1Д ГОСТ 2246-70  
Толщина деталей, мм 8

### **Задание 22**

Способ сварки: Механизированная в CO<sub>2</sub>  
Тип соединения: Стыковое  
Марка стали: 20Х13 ГОСТ 5632-72  
Толщина деталей, мм 2

### **Задание 23**

Способ сварки: Автоматическая в аргоне  
Тип соединения: Стыковое  
Марка стали: 09Х14Н19В2БР ГОСТ 5632-72  
Толщина деталей, мм 6

### **Задание 24**

Способ сварки: Автоматическая под слоем флюса  
Тип соединения: Стыковое  
Марка стали: 20Х23Н18 ГОСТ 5632-72  
Толщина деталей, мм 8

### **Задание 25**

Способ сварки: Ручная дуговая покрытым электродом  
Тип соединения: Стыковое

Марка стали: 20ХГСА ГОСТ 4543-71  
Толщина деталей, мм 6

### **Задание 26**

Способ сварки: Автоматическая в CO<sub>2</sub>  
Тип соединения: Стыковое одностороннее  
Марка стали: 13Х11Н2В2МФ ГОСТ 5632-72  
Толщина деталей, мм 8

### **Задание 27**

Способ сварки: Ручная аргонодуговая  
Тип соединения: Стыковое  
Марка стали: 08Х18Н12Б ГОСТ 5632-72  
Толщина деталей, мм 6

### **Задание 28**

Способ сварки: Ручная дуговая покрытым электродом  
Тип соединения: Стыковое  
Марка стали: 14Х17Н2 ГОСТ 5632-72  
Толщина деталей, мм 5

### **Задание 29**

Способ сварки: Автоматическая под флюсом  
Тип соединения: Стыковое  
Марка стали: 15Х5М ГОСТ 20072-74  
Толщина деталей, мм 20

### **Задание 30**

Способ сварки: Ручная дуговая покрытым электродом  
Тип соединения: Стыковое  
Марка стали: 08Х22Н6Т ГОСТ 5632-72  
Толщина деталей, мм 5

## Список литературы

1. Марочник сталей и сплавов /Под редакцией В.Г.Сорокина.- М.: Машиностроение, 1989.-640с.
2. Журавлев В.Н., Николаева О.И. Машиностроительные стали. Справочник. Изд. 3-е.-М.:Машиностроение, 1981.-391с.
3. Электроды для дуговой сварки и наплавки. Каталог. Киев. Наукова думка, 1967.-440с.
4. Сварочные материалы для дуговой сварки. Т.2. Сварочные проволоки и электроды. /Под редакцией Н.Н.Потапова, -М.: Машиностроение, 1993.-767с.
5. Закс И.А. Электроды для дуговой сварки сталей и никелевых сплавов. Справочное пособие.-СПб.:”Welcome”, 1996.-384с.
6. Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демянцевич В.П. Технология и оборудование сварки плавлением. - М.: Машиностроение, 1977.-432с.
7. Сварка в машиностроении: Справочник. В 4-х т. – т.2 /Под редакцией А.И.Акулова.-М.: Машиностроение, 1978.-462с.
8. Сварка и свариваемые материалы. В 3-х т. – т.1. Свариваемость материалов. Справочное издание. /Под редакцией Э.Л.Макарова.-М.: Металлургия, 1991.-528с.
9. Сварочные материалы для дуговой сварки. В 2-х т. – т.1. Защитные газы и сварочные флюсы. /Под редакцией Н.Н.Потапова.-М.: Машиностроение, 1989.-554с.
10. ГОСТ 5264-80 Швы сварных соединений. Ручная электродуговая сварка. Основные типы и конструктивные элементы.
11. ГОСТ 8713-79 Швы сварных соединений. Автоматическая и полуавтоматическая сварка под флюсом. Основные типы и конструктивные элементы.
12. ГОСТ 14771-76 Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.
13. РД 153-34.1-003-01. Сварка, термообработка и контроль трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже и ремонте энергетического оборудования (РТМ-1с).-М.:ПАО ОБТ, 2001.-399с.
14. Нормативы для технического нормирования работ при автоматической электродуговой сварке под флюсом. ВПТИ.-М.: Машгиз, 1954.-143с.

15. РД 5Р.9083-92. Корпуса стальных судов. Сварка углеродистых и низколегированных сталей. Основные положения.
16. Оборудование для дуговой сварки: Справочное пособие. /Под редакцией В.В.Смирнова. -Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1986.-656с.
17. РТМ 36.26.6-89. Конструкции строительные стальные. Сварка. Общие требования и нормы.
18. Багрянский К.В., Добротина З.А., Хренов К.К.. Теория сварочных процессов. Издание 2-е. -Киев: Вища школа, 1976. - 424с.
19. Петров Г.Л., Тумарев А.С.. Теория сварочных процессов. Издание 2-е.-М.:Высшая школа, 1977.-392с.
20. Шоршоров М.Х., Белов В.В.. Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварки. Атлас.-М.: Наука, 1972. - 219с.
21. Кошкарев Б.Т., Людмирский Н.Ю. Расчет ожидаемых структуры и механических свойств сварочных соединений. Методическое указание. /ДГТУ. Ростов-на-Дону, 1997.-12с.