

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Оборудование и технология сварочного производства»

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СВАРКИ

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов специальности*

*7-06-0714-02 «Инновационные технологии в машиностроении»  
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2024

УДК 621.9.07  
ББК 30.606  
Т33

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Оборудование и технология сварочного производства» «12» декабря 2023 г., протокол № 6

Составитель канд. техн. наук, доц. А. Г. Лупачев

Рецензент канд. техн. наук, доц. А. С. Федосенко

Методические рекомендации к лабораторным работам по дисциплине «Теоретические основы сварки» для студентов специальности 7-06-0714-02 «Инновационные технологии в машиностроении» очной и заочной форм обучения.

Учебное издание

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СВАРКИ

Ответственный за выпуск	А. О. Коротеев
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	М. М. Дударева

Подписано в печать 26.02.2024. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 2,56. Уч.-изд. л. 2,75 . Тираж 26 экз. Заказ № 167.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2024

## Содержание

1 Лабораторная работа № 1. Исследование тепловых процессов при сварке пластин.....	4
2 Лабораторная работа № 2. Исследование проплавления изделий при дуговой сварке плавящимся электродом.....	9
3 Лабораторная работа № 3. Исследование структуры ЗТВ и металла сварных соединений из малоуглеродистой стали.....	16
4 Лабораторная работа № 4. Исследование структуры сварных соединений из чугуна.....	20
5 Лабораторная работа № 5. Исследование структуры сварных соединений из цветных металлов.....	23
6 Лабораторная работа № 6. Исследование образования пор .....	27
7 Лабораторная работа № 7. Исследование механизма образования соединений при холодной сварке.....	31
8 Лабораторная работа № 8. Исследование технологической прочности металла в процессе кристаллизации.....	33
9 Лабораторная работа № 9. Исследование свариваемости сталей, склонных к закалке.....	36
10 Лабораторная работа № 10. Исследование содержания водорода в наплавленном металле.....	39
11 Лабораторная работа № 11. Исследование образования холодных трещин.....	41
12 Лабораторная работа № 12. Моделирование техники выполнения сварных соединений на базе симулятора сварочных процессов с использованием дополнительной 3D-реальности.....	42
13 Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ.....	44
14 Действия на случай возникновения загорания, пожара .....	46
15 Действия на случай других аварийных ситуаций .....	46
Список литературы.....	47

# 1 Лабораторная работа № 1. Исследование тепловых процессов при сварке пластин

**Цель работы:** освоить методику расчета температурных полей при нагреве тела сварочным источником тепла.

## 1.1 Общие теоретические сведения

Температурное поле – распределение температур в конкретный момент времени; оно может выражаться как в абсолютной температуре  $T$ , так и в приращении температур  $\Delta T$  по отношению к начальной температуре тела  $T_n$ .

Характер распространения теплоты в теле существенно зависит от формы и размеров последнего. Обычно выбирают одну из следующих схем.

Бесконечное тело – тело, имеющее значительную протяженность по всем координатным осям  $X, Y, Z$ .

Полубесконечное тело – тело с одной ограничивающей плоскостью, на которой действует источник теплоты, а остальные границы тела находятся на значительном удалении и практически не влияют на характер теплового поля.

Плоский слой – тело, ограниченное двумя параллельными плоскостями, в котором распределение температур по толщине не является равномерным.

Бесконечная пластина – плоский слой, в котором температура по оси, перпендикулярной к плоскостям, постоянна.

Схематизацию источников теплоты производят по следующим признакам:

- по распределенности – источники точечный, линейный, плоский, объемный;
- по времени действия – мгновенный и постоянно действующий;
- по расположению относительно рассматриваемой точки – неподвижный, подвижный и быстро движущийся.

Уравнение предельного состояния для процесса распространения тепла от точечного источника постоянной мощности, движущегося с постоянной скоростью по поверхности полубесконечного тела, отнесенное к подвижной системе координат, имеет следующий вид:

$$\Delta T(R, x) = \frac{q_u}{2\pi\lambda R} e^{-\frac{v}{2a}(R+x)},$$

где  $R$  – расстояние точки, в которой определяется температура от начала подвижной системы координат;

$x$  – абсцисса точки в подвижной системе координат;

$\lambda$  – теплопроводность, Вт/(см · К);

$q_u$  – эффективная тепловая мощность, Вт;

$v$  – скорость сварки, см/с.

При небольшой скорости перемещения источника тепло распространяется впереди источника.

Уравнение предельного состояния для процесса распространения тепла от линейного источника постоянной мощности, движущегося с постоянной скоростью по стыку свариваемых полубесконечных пластин, относительно подвижной системы координат имеет следующий вид:

$$\Delta T(R, x) = \frac{q_u}{2\pi\lambda\delta} e^{-\frac{vx}{2a}} K_0(U),$$

где  $R$  – расстояние от центра источника тепла (начала координат) до интересующей нас точки;

$K_0(U)$  – функция Бесселя 2-го рода нулевого порядка от аргумента.

$$U = R \sqrt{\frac{V^2}{4a^2} + \frac{b}{a}},$$

где  $b$  – коэффициент теплоотдачи, 1/с;

$$b = \frac{2\alpha}{c\gamma\delta};$$

$\alpha$  – коэффициент поверхностной теплоотдачи, Вт/(см<sup>2</sup>· К);

$c\gamma$  – объемная теплоемкость, Дж/(см<sup>3</sup>· К);

$\delta$  – толщина пластины, см.

Следует отметить некоторые особенности в расчетах по схеме линейного источника постоянной мощности. Функция Бесселя предусматривает интенсивность теплоотвода. Тепловое поле в пластине «стесненное» по сравнению с полем точечного источника в полубесконечном теле.

Уравнение предельного состояния для процесса распространения тепла от точечного быстро движущегося мощного источника тепла по поверхности массивного тела имеет вид:

$$\Delta T(R, t) = \frac{q_u}{2\pi\lambda x} e^{-\frac{R^2 v}{4ax}},$$

где  $R$  – расстояние от центра источника тепла (начала координат) до интересующей нас точки,  $R = \sqrt{y^2 + z^2}$ .

Уравнение предельного состояния для процесса распространения тепла от линейного мощного быстро движущегося источника по стыку свариваемых пластин имеет вид:

$$\Delta T(y, t) = \frac{q_u}{vc\delta\gamma\sqrt{4at\pi}} e^{-\frac{y^2}{4at} - bt},$$

где  $a$  – коэффициент теплопроводности, см<sup>2</sup>/с;

$t$  – время, отсчитываемое от момента прохождения одной плоскости, в которой находится исследуемая точка.

## **1.2 Оборудование, приборы и материалы**

1.2.1 Справочная литература.

1.2.2 Калькулятор (ПЭВМ).

## **1.3 Порядок проведения работы**

1.3.1 Получить у преподавателя задание на расчетное исследование: марку металла, расчетную схему источника тепла и нагреваемого тела, режимы сварки, температуры подогрева и другие сведения.

1.3.2 Рассчитать температурные поля и другие параметры нагрева в соответствии с индивидуальным заданием.

### **Вариант 1**

Рассчитать распределение температур по оси  $OX$  (вдоль оси шва) и по оси  $OY$  (поперек оси шва) на различных расстояниях при наплавке валика на массивную стальную деталь.

*Исходные данные.*

Материал: сталь 20.

Способ сварки: механизированная в среде защитных газов.

Параметры режима сварки представлены в таблице 1.1.

Теплофизические величины для стали представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.1 – Параметры режима сварки

Номер задания	Сила сварочного тока $I_{св}$ , А	Напряжение $U$ , В	Скорость сварки $V$ , см/с
1	240	24	0,15
2	230	23	0,15
3	220	22	0,1
4	210	22	0,1
5	200	22	0,1
6	340	30	0,3
7	320	28	0,3
8	300	26	0,3
9	280	25	0,2
10	260	25	0,2

Таблица 1.2 – Теплофизические величины для стали

Наименование	Обозначение	Единица измерения	Величина
Коэффициент теплопроводности	$\lambda$	$\frac{\text{Вт}}{\text{см} \cdot \text{К}}$	0,4
Коэффициент температуропроводности	$a$	$\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$	0,08
Коэффициент теплоотдачи	$\alpha$	$\frac{\text{Вт}}{\text{см}^3 \cdot \text{К}}$	$6 \cdot 10^{-3}$
Удельная теплоёмкость	$c\gamma$	$\frac{\text{Дж}}{\text{см}^3 \cdot \text{К}}$	4,8

Расчетная схема источника тепла – точечный непрерывно действующий подвижный источник.

Для расчета нагрева тела данным источником используем формулу

$$\Delta T(R, x) = \frac{q_u}{2\pi\lambda R} e^{-\frac{v}{2a}(R+x)},$$

где

$$q_u = 0,8 \cdot I \cdot U ;$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2} .$$

## Вариант 2

Расчитать распределение температур по оси  $OX$  (вдоль оси шва) и по оси  $OY$  (поперек оси шва) на различных расстояниях при сварке пластины встык за один проход.

*Исходные данные.*

Материал: сталь 20.

Тип сварки: механизированная в среде защитных газов.

Параметры режима сварки представлены в таблице 1.3.

Теплофизические величины для стали представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.3 – Параметры режима сварки

Номер задания	Сила сварочного тока $I$ , А	Напряжение $U$ , В	Скорость сварки $V$ , см/с	Толщина пластины $\delta$ , см
1	240	24	0,3	0,6
2	230	23	0,25	0,5
3	220	22	0,2	0,4
4	210	22	0,15	0,6
5	200	22	0,1	0,6

Расчетная схема источника тепла – линейный непрерывно действующий подвижный источник.

Для расчета нагрева тела данным источником используем формулу

$$\Delta T(R, x) = \frac{q_u}{2\pi\lambda R\delta} e^{-\frac{Vx}{2a}} K_0(u),$$

где  $K_0(u)$  – функция Бесселя 2-го рода нулевого порядка от аргумента;  
 $\delta$  – толщина пластины, см;

$$q_u = 0,8 \cdot I \cdot U ;$$

$$u = R \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}} ;$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2} ;$$

$$b = \frac{2 \cdot \alpha}{c\gamma \cdot \delta} .$$

Пространственное расположение графиков в качестве примера представлено на рисунке 1.1.

### ***1.4 Содержание отчета***

- 1.4.1 Название и цель работы.
- 1.4.2 Исходные данные согласно индивидуальному заданию.
- 1.4.3 Схема источника нагрева и нагреваемого тела.
- 1.4.4 Результаты расчетов в виде графиков.
- 1.4.5 Выводы по работе.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Какова физическая сущность процесса распространения теплоты при сварке?
- 2 Каким образом влияют параметры режима на распространение теплоты при сварке?
- 3 Каким образом можно воздействовать на размеры зоны термического влияния?
- 4 Как выбрать схему нагреваемого тела и схему источника тепла в каждом конкретном случае?



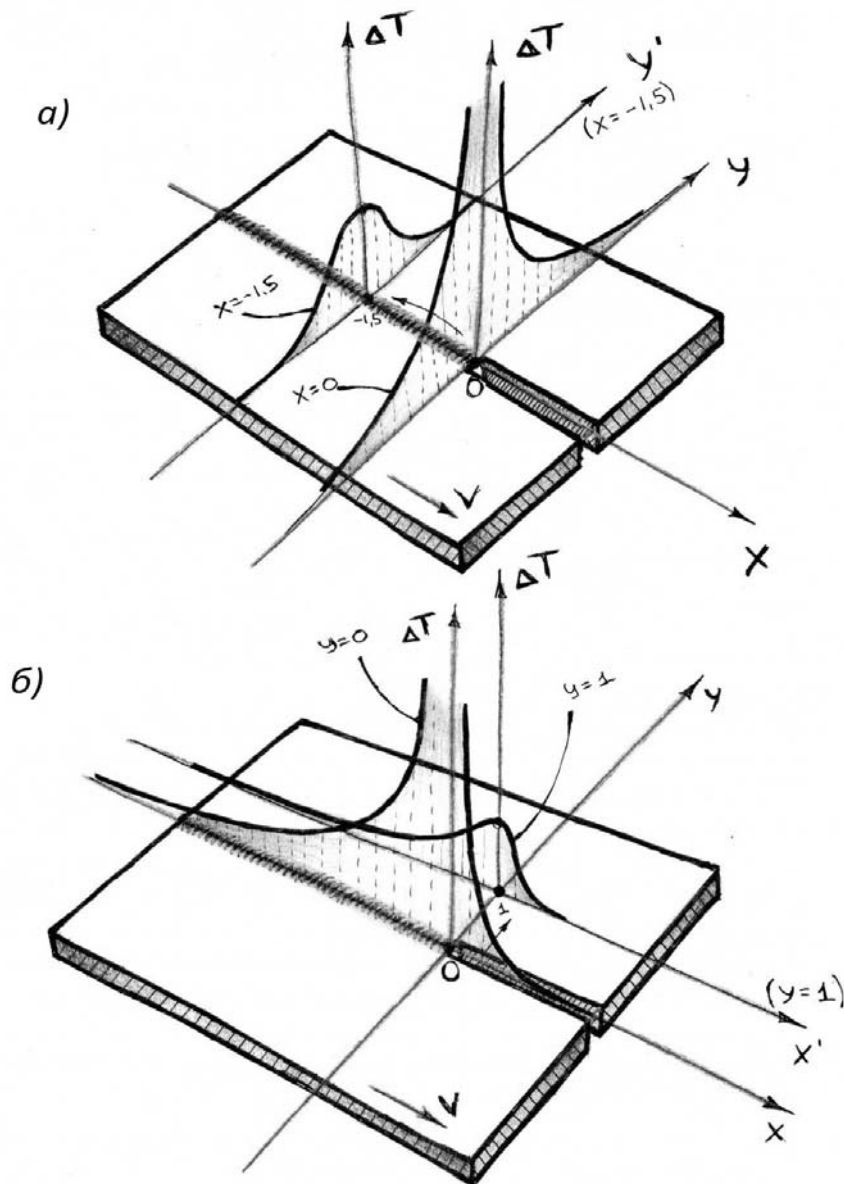


Рисунок 1.1 – Графики распределения приращения температуры  $\Delta T$  по осям  $OX$  (а) и  $OY$  (б)

## 2 Лабораторная работа № 2. Исследование проплавления изделий при дуговой сварке плавящимся электродом

**Цель работы:** овладеть методикой расчетного и экспериментального определения термического КПД, величины проплавления и площадей проплавления и наплавки; изучить влияние параметров режима на производительность.

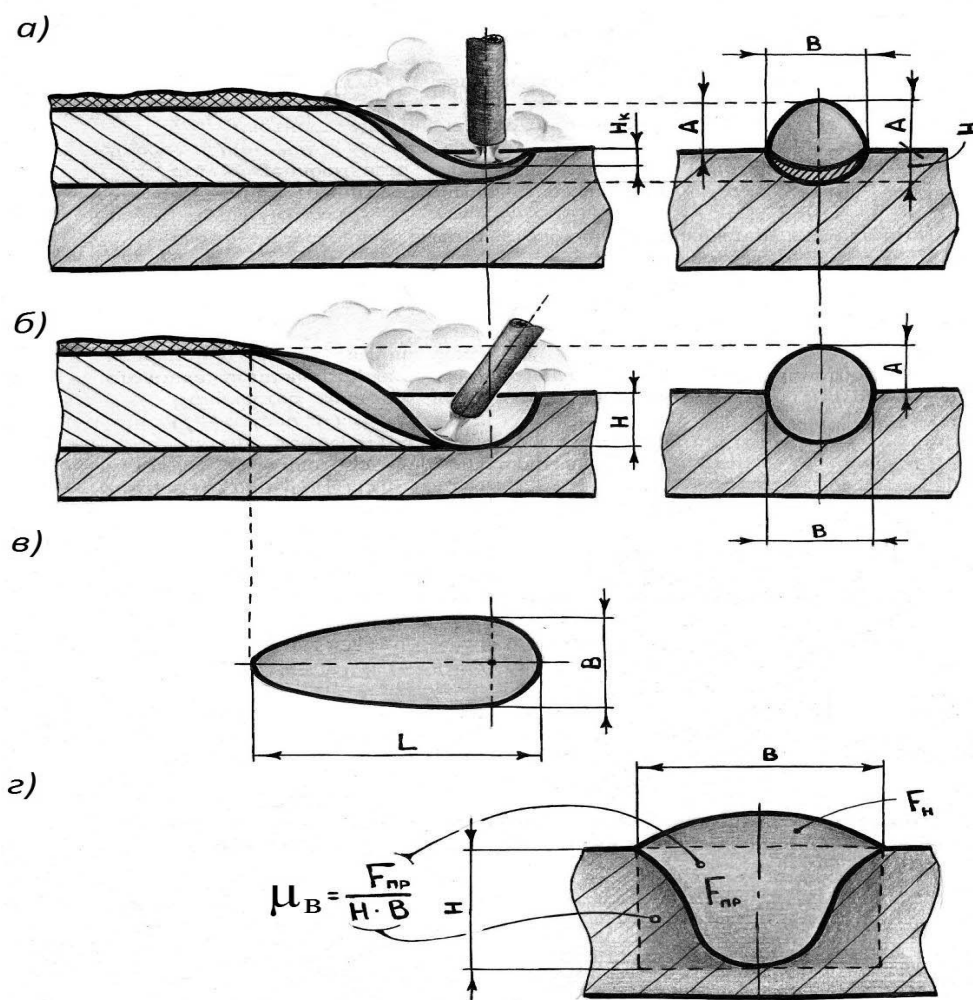
### 2.1 Общие теоретические сведения

При дуговой сварке протекают два тесно связанных между собой тепловых процесса. Тепло сварочной дуги разогревает основной металл свариваемого изделия и проплавляет его поверхность или кромки на определенную глубину.

При сварке плавлением источник тепла – сварочная дуга должна проплавливать основной металл изделия на определенную глубину. Практически среднюю глубину проплавления при дуговой сварке поддерживают в пределах не менее 1...1,5 мм. Слишком большой прогрев основного металла может привести к подрезам у краев шва и к сквозному проплавлению металла.

При поверхностной дуге кратер неглубок, пятно дуги мало углубляется относительно поверхности металла; под пятном остаётся слой жидкого металла. При сварке поверхностной дугой глубина проплавления сравнительно невелика. При погруженной дуге жидкая ванна оттесняется к застывающему концу; пятно и столб дуги полностью или частично погружаются в кратер и более эффективно оплавливают дно ванны и её переднюю кромку.

Геометрические размеры ванны и валика характеризуются обычно следующими параметрами (рисунок 2.1).



*a* – наплавка поверхностной дугой; *б* – наплавка погруженной дугой; *в* – основные геометрические параметры сварочной ванны; *г* – коэффициент полноты проплавления

Рисунок 2.1 – Геометрические параметры наплавленного валика

На рисунке 2.1 приняты следующие обозначения:  $L$  – длина ванны;  $B$  – ширина ванны;  $H$  – глубина проплавления;  $A$  – высота наплавки;  $H_k$  – глубина кратера. Все параметры, за исключением  $L$  и  $H_k$ , определяют обычно по шлифам поперечных сечений валика. Длину ванны  $L$  определяют по застывшему кратеру в конце валика. Глубину  $H_k$  по застывшему валику определить трудно, т. к. после обрыва дуги и прекращения дутья жидкий металл ванны стремится заполнить кратер. Поэтому застывший кратер имеет меньшую глубину, чем кратер в жидкой ванне при горении дуги. Глубину  $H_k$  иногда определяют просвечиванием рентгеновскими лучами.

В зависимости от режима сварки и от способа ведения дуги зона проплавления принимает различные очертания. Очертания зоны проплавления характеризуют следующие параметры: относительная глубина проплавления  $H/B$  и коэффициент полноты  $\mu_v = F_{np}/HB$ .

Ручная сварка отличается большим разбросом значений  $H/B$ .

Коэффициент полноты  $\mu_v$  обычно меньше единицы, т. к. очертание зоны проплавления вписывается в прямоугольник с основанием  $B$  и высотой  $H$  (см. рисунок 2.1).

Поперечное сечение переплавляемого металла условно делят на зону наплавки  $F_n$ , находящуюся вне первоначальной кромки основного металла, и зону проплавления  $F_{np}$ , расположенную внутри этой кромки. Отношение  $F_{np}/F_n$  называется коэффициентом площадей.

Принципиально, сварные швы можно условно разделить на две группы:

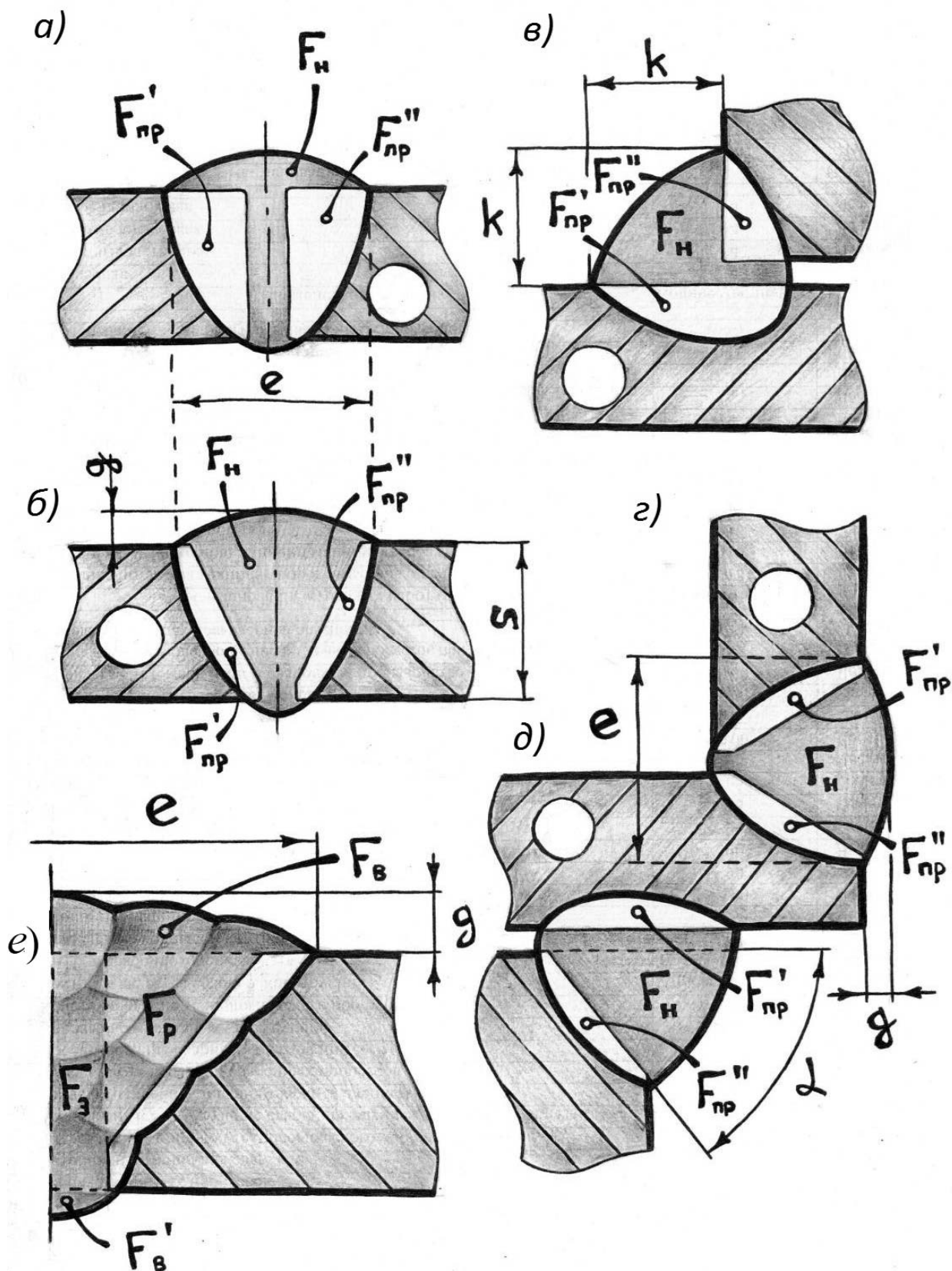
1)  $A$  – швы, образуемые преимущественно наплавленным металлом, у которых коэффициент площадей  $F_{np}/F_n$  мал, например, стыковые швы с разделкой кромок (рисунок 2.2, б) и угловые швы с разделкой кромок и заданным катетом (рисунок 2.2, г, д). При сварке таких швов нужно выбирать режим, обеспечивающий максимальную величину  $F_n$  при минимальной  $F_{np}$ ;

2)  $B$  – швы, образуемые преимущественно проплавленным металлом, у которых требуемый коэффициент площадей весьма велик, например, стыковые швы без разделки кромок (рисунок 2.2, а), угловые швы с малым катетом и глубоким проплавлением (рисунок 2.2, в). При сварке таких швов режим должен обеспечивать максимальную площадь проплавления.

Излишнее расплавление электродного металла в этом случае дает только непроизводительный расход металла. При подборе режима сварки швов типов  $A$  и  $B$  следует добиваться прямо противоположных результатов, т. е. назначать режимы исходя из особенностей швов.

Сварка швов типа  $A$  должна производиться при максимально возможных значениях коэффициента наплавки  $\alpha_n$ , умеренных величинах тока и умеренных скоростях сварки.

Сварка швов типа  $B$  должна производиться при минимальных значениях  $\alpha_n$  и максимально возможных токах и скоростях сварки. Швы такого типа являются принципиально более экономичными как по расходу электродного металла, так и по трудоемкости.



а, б – стыковые соединения без разделки (С2) и с разделкой (С17) кромок соответственно; в – угловой шов без разделки кромок (Т1); г – угловое соединение, выполненное стыковым швом (У9); д – угловой шов с разделкой кромок (Т6); е – многопроходная сварка стыкового соединения

Рисунок 2.2 – Типы сварных швов

Для повышения скорости сварки швов, образуемых преимущественно за счет проплавления основного металла, следует:

- применять электроды, характеризующиеся большим допусаемым током и большим номинальным напряжением дуги;
- применять электроды или технику сварки, обеспечивающие наибольшие значения относительной глубины проплавления.

Для расчета площади проплавления по существующим формулам необходимо знать величину термического КПД  $\eta_t$  для данного режима.

## 2.2 Оборудование, приборы и материалы

2.2.1 Сварочный пост переменного (или постоянного) тока с измерительными приборами.

2.2.2 Штангенциркуль.

2.2.3 Лентопильный станок.

2.2.4 Образцы стальные.

2.2.5 Реактивы для травления микрошлифов.

## 2.3 Порядок проведения работы

2.3.1 Рассчитать численное значение  $\eta_t$  (теоретический КПД проплавления) для заданных режимов. Для расчета пользоваться графическим методом Н. Н. Рыкалина. На основном расчетном графике дана зависимость искомой величины  $\eta_t$  от  $\varepsilon_3$  – безразмерного критерия режима – для различной относительной глубины проплавления  $h/b$ .

Данные для расчета взять из таблицы 2.1.

Таблица 2.1 – Исходные данные

Номер валика	$I_{св}$ , А	$U_d$ , В	$v_{св}$ , см/с
1	400	34	0,69
2	650	36	
3	800	38	

Последовательность расчета:

1) вычисляется критерий режима  $\varepsilon_3$ :

$$\varepsilon_3 = \frac{q \cdot v_{св}}{a^2 \cdot S_{нл}^I},$$

где  $q$  – эффективная тепловая мощность, Вт; для дуги  $q = \eta_u \cdot U_d \cdot I_{св}$  (при  $\eta_u = 0,8$ );

$v_{св}$  – скорость сварки, см/с;

$a$  – коэффициент температуропроводности,  $a = 8 \cdot 10^{-2}$  см<sup>2</sup>/с;

$S_{nl}^I$  – теплосодержание расплавленного металла,  $S_{nl}^I = 10500$  Дж/см<sup>3</sup>;

2) по графику (рисунок 2.3) находим  $\eta_t$ , соответствующий вычисленному значению  $\varepsilon_3$  (используется кривая  $h/b = 0,5$ ), т. к. производится наплавка узкого валика.

2.3.2 Рассчитать для заданных режимов площадь проплавления  $F_{np}$ , площадь наплавки  $F_n$  и коэффициенты площадей  $F_{np}/F_n$ .

Площадь проплавления  $F_{np}$  определяется из выражения

$$F_{np} = \frac{\eta_t \cdot q}{S_{nl}^I \cdot v_{св}}$$

Площадь наплавки  $F_n$  находится из выражения

$$F_n = \frac{\alpha_n \cdot (1 - \psi) \cdot I_{св}}{\gamma \cdot v_{св} \cdot 3600},$$

где  $\alpha_n$  – коэффициент наплавки; для механизированной сварки в  $CO_2$   $\alpha_n = 12 \dots 14$  г/(А·ч);

$v_{св}$  – скорость сварки, см/с;

$\psi$  – коэффициент потерь; для сварки в  $CO_2$   $\psi = 0,12$  (12 %);

$\gamma$  – плотность стали,  $\gamma = 7,8$  г/см<sup>3</sup>.

Коэффициент площадей  $F_{np}/F_n$  определяется как отношение полученных площадей.

2.3.3 Произвести наплавку валиков на пластины.

2.3.4 Разрезать пластину с наплавкой на механической ножовке в том месте валика, где скорость сварки максимально приближается к заданной.

2.3.5 Отшлифовать плоскость разреза.

2.3.6 Протравить шлиф и высушить.

2.3.7 Тонким карандашом обвести на кальке границы области проплавления и наплавки. Наложить кальку на миллиметровую бумагу и возможно точнее подсчитать по клеточкам площади проплавления и наплавки.

2.3.8 По полученному экспериментально  $F_{np}$  определить  $\eta_t$ :

$$\eta_t = \frac{v_{св} \cdot F_{np} \cdot S_{nl}^I}{q},$$

где  $v_{св}$  – фактическая скорость сварки при опыте, м/с;

$F_{np}$  – площадь проплавления по замеру шлифа, м<sup>2</sup>;

$q$  – эффективная мощность дуги по данным опыта, Вт.

2.3.9 Рассчитать коэффициент площадей по экспериментальным данным.

2.3.10 Результаты расчетов и экспериментов оформить в виде графиков.

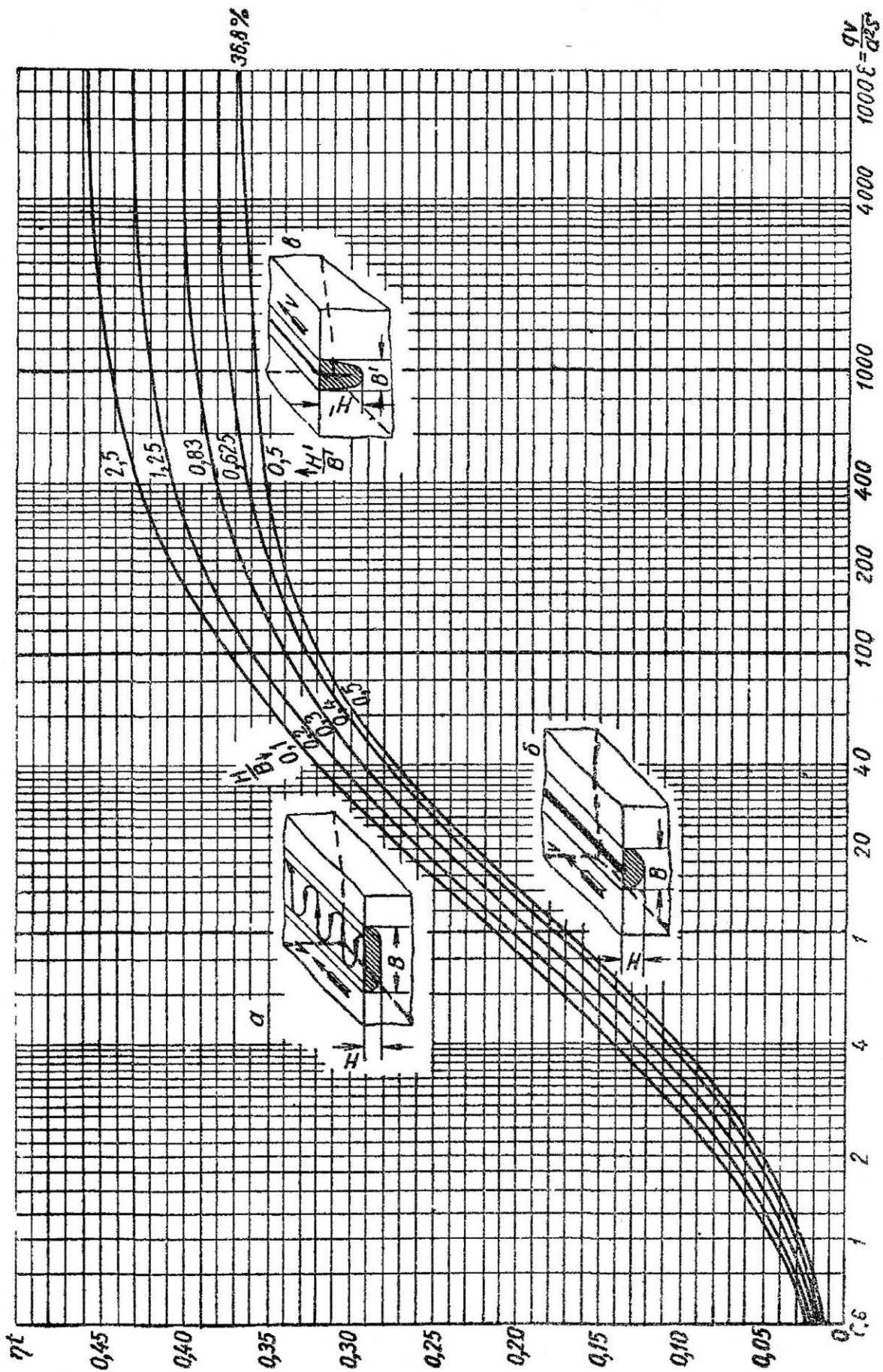


Рисунок 2.3 – График для расчетного определения термического КПД при наплавке валика на массивное тело

## **2.4 Содержание отчета**

- 2.4.1 Цель работы.
- 2.4.2 Рабочее задание.
- 2.4.3 Описание экспериментальной части работы.
- 2.4.4 Расчет  $\eta_t$ ,  $F_{np}$ ,  $F_n$  (приводится полностью).
- 2.4.5 Расчетная обработка экспериментальных данных.
- 2.4.6 Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Как влияют параметры режима сварки на величину термического КПД?
- 2 Каковы пути повышения термического, эффективного КПД при сварке?
- 3 Почему изменяются размеры шва при изменении скорости сварки?
- 4 Как изменяются размеры шва при изменении напряжения (тока) дуги?

## **3 Лабораторная работа № 3. Исследование структуры ЗТВ и металла сварных соединений из малоуглеродистой стали**

**Цель работы:** выявить особенности структуры наплавленного металла и зоны термического влияния (ЗТВ) при сварке углеродистых сталей.

### **3.1 Общие теоретические сведения**

Стали – самый широко применяемый материал.

Наибольшее влияние на свойства стали оказывает углерод, поэтому сталь рассматривается прежде всего как сплав железа с углеродом.

К низкоуглеродистым сталям относят стали с содержанием углерода  $C \leq 0,25$  %. Данные стали являются доэвтектоидными и имеют структуру Ф + П.

Феррит – твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железе. Свойства феррита близки к свойствам железа. Он мягок (твердость – 130 НВ, предел прочности  $\sigma_s = 300$  МПа), пластичен и магнитен до 768 °С.

Перлит – механическая смесь феррита и цементита.

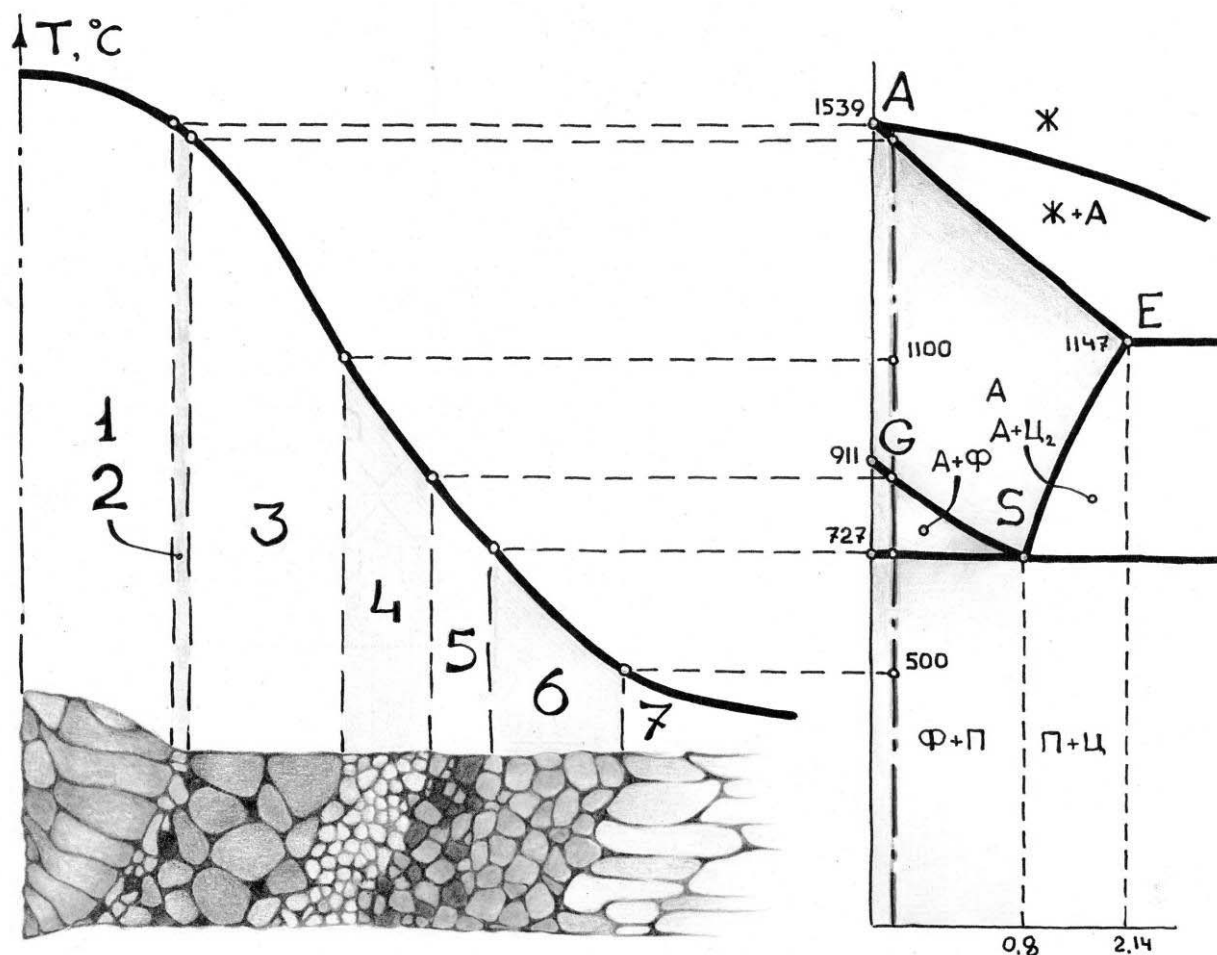
Цементит – химическое соединение железа с углеродом  $Fe_3C$  (карбид железа) содержит 6,67 % углерода. Цементит имеет чрезвычайно высокую твердость (800 НВ), но очень низкую пластичность.

По действием тепла, выделяемого при сварке, основной металл плавится и, кристаллизуясь, совместно с присадочным или электродным металлом образует литой сварной шов. Шов после кристаллизации имеет дендритную структуру, характер которой определяется размером и формой сварочной ванны (так называемой схемой кристаллизации).



В процессе охлаждения первичная аустенитная структура (образованная после кристаллизации) претерпевает полиморфное превращение, в результате которого образуется вторичная ферритно-перлитная структура.

На рисунке 3.1 схематично показан сварной шов, а непосредственно над ним в том же масштабе по длине – распределение температуры по поверхности свариваемой детали в момент максимального нагрева.



1 – литой металл сварного шва; 2 – зона неполного расплавления; 3 – зона перегрева; 4 – участок нормализации; 5 – участок неполной перекристаллизации; 6 – зона рекристаллизации; 7 – зона синеломкости

Рисунок 3.1 – Структура зоны термического влияния сварного соединения

Структурное состояние свариваемого металла при различных температурах нагрева показано в диаграмме состояния сплава Fe–C вертикальной линией.

В зависимости от температуры нагрева при сварке малоуглеродистых стальных изделий можно различать в ЗТВ следующие структурные участки: 2 – неполного расплавления; 3 – перегрева; 4 – нормализации; 5 – неполной перекристаллизации; 6 – рекристаллизации; 7 – синеломкости (цифрой 1 обозначен непосредственно сварной шов).

Участок неполного расплавления является переходным от металла наплавленного к металлу основному и включает узкую полоску основного металла, нагреваемую при сварке до температур начала и конца плавления.

Участок перегрева. Этот участок включает металл, нагреваемый до температуры, близкой к температуре плавления.

В связи с этим здесь развивается крупное зерно и часто появляется структура перегрева, которая является неблагоприятной для вязкости металла.

Участок нормализации охватывает металл, нагреваемый в процессе сварки несколько выше критической точки  $A_{C3}$ . Благодаря протеканию процесса перекристаллизации при нагреве и охлаждении, будет иметь место значительное измельчение зерен металла.

Участок неполной перекристаллизации включает металл, получивший максимальную температуру нагрева при сварке в пределах от точки  $A_{C1}$  до точки  $A_{C3}$ .

Участок неполной перекристаллизации можно также назвать участком неполной нормализации или неполного отжига.

Участок рекристаллизации находится в границах температур сварочного нагрева от  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ... $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  до точки  $A_{C1}$ , т. е. до  $725\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Явление рекристаллизации в литом металле не имеет места, потому что зерна металла здесь разобщены тонкой пограничной пленкой межкристаллитного вещества и микроскопическими пораами и пустотами.

Рекристаллизация или рост зерна заключается в переходе атомов железа из решетки одного зерна в соседнюю. В результате одни зерна, имеющие меньшую величину свободной энергии, постепенно увеличиваются в размерах, в то время как другие уменьшаются и могут совсем исчезнуть.

Теоретическая температура начала рекристаллизации железа находится около  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Однако скорость рекристаллизации при этой температуре еще очень мала, и практически рекристаллизация заметно идет только при более высоких температурах, начиная с  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  и выше. Высшим пределом интервала рекристаллизации для стали следует считать  $725\text{ }^{\circ}\text{C}$ , т. к. при этой температуре начинается уже перекристаллизация металлической основы стали.

Пластическая деформация металлов сопровождается значительным упрочнением – предел прочности и твердость металла заметно повышаются, а относительное удлинение и ударная вязкость резко снижаются.

Нагрев пластически деформированного металла до температур рекристаллизации, называемый в практике термической обработки рекристаллизационным отжигом, возвращает стали прежние механические свойства.

Следовательно, структура рекристаллизации будет сильно отличаться от структуры основного металла, если последний перед сваркой был подвергнут пластической деформации.

Участок синеломкости по структуре совершенно не отличается от основного металла, полностью сливаясь с последним. Однако о существовании этого участка, в котором основной металл нагревается при сварке до

температур порядка 200 °С...500 °С, следует помнить, т. к. металл в этом температурном интервале обладает пониженной пластичностью. При температурах порядка 200 °С...300 °С предел прочности и предел текучести стали несколько повышаются, а удлинение и сужение площади поперечного сечения заметно снижаются. При температурах 500 °С...550 °С заметно снижается ударная вязкость. Это явление (синеломкость) пытаются объяснить выпадением из твердого раствора субмикроскопических частиц различных примесей, располагающихся по границам зерен и тем самым понижающих пластичность металла.

### ***3.2 Оборудование, приборы и материалы***

3.2.1 Образцы из низкоуглеродистой стали.

3.2.2 Пост механизированной или ручной дуговой сварки.

3.2.3 Оборудование для изготовления и механической обработки образцов из полученного в процессе проведения работы сварного соединения.

3.2.4 Металлографический микроскоп.

3.2.5 Набор реактивов для выявления макро- и микроструктуры сварного соединения.

### ***3.3 Порядок проведения работы***

3.3.1 Сварить подготовленные образцы в виде пластин.

3.3.2 Вырезать из сварного соединения образец для изготовления шлифа.

3.3.3 Отшлифовать и отполировать вырезанный образец.

3.3.4 Подготовить реактив для травления и протравить два образца.

3.3.5 Визуально оценить микроструктуру сварного соединения.

3.3.6 На металлографическом микроскопе исследовать микроструктуру зоны термического влияния.

### ***3.4 Содержание отчета***

3.4.1 Название и цель работы.

3.4.2 Рабочее задание.

3.4.3 Схема структурных составляющих ЗТВ.

3.4.4 Рисунки шлифов и рисунки исследованных участков ЗТВ.

3.4.5 Выводы по работе.

### ***Контрольные вопросы***

1 В чем заключается особенность структуры металла сварного шва и от чего она зависит?

2 Что такое зона термического влияния?

3 От каких факторов зависит размер зоны термического влияния и отдельных её участков?

4 Какие участки наблюдаются в ЗТВ при сварке холодно деформированной малоуглеродистой стали?

5 Что такое первичная структура металла и чем она отличается от вторичной структуры?

## 4 Лабораторная работа № 4. Исследование структуры сварных соединений из чугуна

**Цель работы:** выявить влияние термического цикла сварки на структуру металла шва и ЗТВ и изучить методы предотвращения отбела сварных швов.

### 4.1 Общие теоретические сведения

К чугунам относятся сплавы железа с углеродом, содержание которого превышает 2,14 %. В этих сплавах обычно присутствует также Si и некоторое количество Mn, S и P, а иногда и другие элементы, вводимые как легирующие добавки для придания чугунам определенных свойств. К числу таких легирующих элементов можно отнести Ni, Cr, Mg и др.

В зависимости от структуры чугуны могут быть разделены на четыре группы:

- 1) белый чугун (без включений графита, весь углерод связан в химическое соединение карбид железа  $Fe_3C$ –цементит) (рисунок 4.1, а);
- 2) серый чугун (пластинчатый графит) (рисунок 4.1, б);
- 3) ковкий чугун (графит хлопьевидной формы) (рисунок 4.1, в);
- 4) высокопрочный чугун (шаровидный графит) (рисунок 4.1, г).

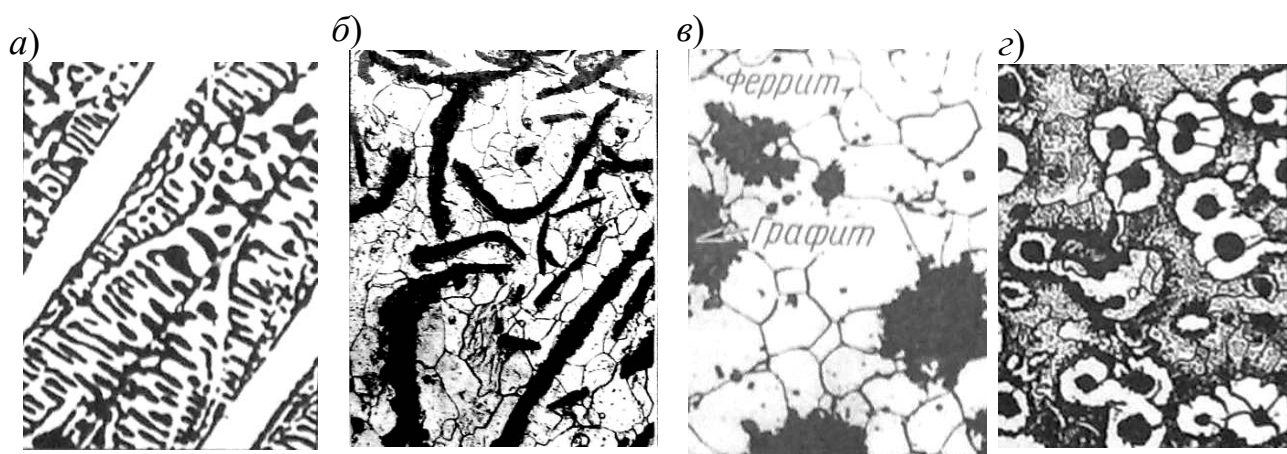


Рисунок 4.1 – Микроструктуры чугунов

Сварочный нагрев и последующее охлаждение настолько изменяют структуру и свойства чугуна в зоне расплавления и околошовной зоне, что

получить сварные соединения без дефектов с необходимым уровнем свойств оказывается весьма затруднительно.

Причины, затрудняющие получение качественных сварных соединений из чугуна, следующие.

Высокие скорости охлаждения металла шва и зоны термического влияния, соответствующие термическому циклу сварки, приводят к отбеливанию чугуна.

Вследствие местного неравномерного нагрева металла возникают сварочные напряжения, которые в связи с очень незначительной пластичностью чугуна приводят к образованию трещин в шве и околошовной зоне.

Наиболее радикальным средством борьбы с образованием отбеленных и закаленных участков шва и околошовной зоны и образованием пор и трещин служит подогрев изделия до температуры 600 °С...650 °С и медленное охлаждение его после сварки (горячая сварка чугуна).

Горячая сварка чугуна позволяет получать сварные соединения, равноценные свариваемому.

Сварку с подогревом до температур 300 °С...400 °С называют полугорячей, а без предварительного подогрева холодной сваркой чугуна. При полугорячей и холодной сварке чугуна широко используют металлургические и технологические средства воздействия на металл шва с целью повышения качества сварных соединений. К их числу относятся:

- легирование наплавленного металла элементами-графитизаторами (Si), с тем чтобы при данной скорости охлаждения получить в шве структуру серого чугуна;

- легирование металла сильными карбидообразователями (например, ванадием). Металлическая основа при этом оказывается обезуглероженной и достаточно пластичной (Ф + П);

- применение сварочных материалов, обеспечивающих в наплавленном металле получение различных сплавов цветных металлов: медно-никелевых, медно-железных, железоникелевых и др., обладающих высокой пластичностью и имеющих температуру плавления, близкую к температуре плавления чугуна.

При сварке плавлением без предварительного подогрева применяют электроды из цветных металлов и их сплавов, комбинированные электроды (аустенитно-медные), порошковую и самозащитную проволоку (ПАНЧ-11). Медь и никель не образуют соединений с углеродом, но их наличие в сплаве уменьшает растворимость углерода в железе и способствует графитизации.

Структурные превращения на участках ЗТВ при сварке серого чугуна характеризуются наличием пяти основных участков.

Первый участок (неполного расплавления). Металл первого участка характерен наличием при высокой температуре твердой (аустенит) и жидкой фаз. При ускоренном охлаждении жидкая фаза затвердевает с образованием белого чугуна, а в твердой фазе возможно образование прослойки мартенсита и ледебурита.

Применение электродов и сварочной проволоки, содержащих в своем составе Ni или такие графитизаторы, как C и Si, способствует уменьшению

размера ледебуритной прослойки и в определенных условиях (при соответствующей концентрации этих элементов и режиме сварки) – полному ее устранению. Наличие мартенсита в околошовной зоне и ширина мартенситной прослойки не зависят от химического состава электродного металла, а определяются главным образом режимом сварки, т. е. скоростью охлаждения в интервале наименьшей устойчивости аустенита.

Структура на втором участке (участок аустенита) зависит от исходной структуры чугуна и будет состоять из аустенита и графита, аустенита и цементита или аустенита, графита и цементита. Вблизи первого участка аустенит более насыщен углеродом. При быстром остывании избыточный углерод из аустенита может выделяться в виде цементита. В результате переохлаждения аустенита возможно образование мартенсита.

В третьем участке, участке неполной перекристаллизации, благодаря большой скорости нагрева и кратковременности пребывания металла в этой области температур не происходит полного фазового превращения. Участок имеет переходную структуру от второго к четвертому.

В четвертом участке (участок рекристаллизации или графитизации и сфероидизации карбидов) происходит некоторое увеличение количества графита за счет частичного распада карбидов, некоторая сфероидизация карбидов.

За четвертым участком следует металл, температура нагрева которого не превышает 400 °С...500 °С. При таком нагреве каких-либо изменений структуры не происходит. Это основной металл с исходной структурой.

Таким образом при холодной сварке чугуна в зоне термического влияния при охлаждении возникают закалочные структуры – мартенсит и продукты его распада, а также включения графита. Между основным и наплавленным металлом имеется тонкий отбеленный слой – зона частичного расплавления. При горячей сварке перекристаллизация аустенита происходит при небольших скоростях охлаждения, что приводит к возникновению дисперсной ферритно-перлитной структуры.

## ***4.2 Оборудование, приборы и материалы***

4.2.1 Образцы из чугуна.

4.2.2 Пост механизированной или ручной дуговой сварки.

4.2.3 Оборудование для изготовления и механической обработки образцов.

4.2.4 Металлографический микроскоп.

4.2.5 Набор реактивов для выявления макро- и микроструктуры сварного соединения.

## ***4.3 Порядок проведения работы***

4.3.1 С помощью микроскопа изучить структуру металла шва и ЗТВ.

4.3.2 Произвести металлографический анализ и зарисовать структуру участков, заданных преподавателем.

4.3.3 Определить ширину и сплошность зоны отбела у линии сплавления и оценить качество соединения в целом.

#### **4.4 Содержание отчета**

4.4.1 Название и цель работы.

4.4.2 Рабочее задание.

4.4.3 Рисунки шлифов и рисунки исследованных участков ЗТВ с описанием структур.

4.4.4 Выводы по работе.

#### **Контрольные вопросы**

1 Что такое цементит?

2 В чем состоит особенность чугуна как свариваемого материала?

3 Как влияет скорость охлаждения на структуру сварного соединения из чугуна.

4 С какой целью применяют электроды из цветных металлов?

### **5 Лабораторная работа № 5. Исследование структуры сварных соединений из цветных металлов**

**Цель работы:** выявить особенности структуры наплавленного металла и ЗТВ при сварке цветных металлов и изучить закономерности ее образования.

#### **5.1 Общие теоретические сведения**

Наиболее часто для сварных конструкций применяют такие цветные металлы, как медь, алюминий, титан и их сплавы.

Медь используют в химическом и энергетическом машиностроении ввиду высокой электро- и теплопроводности, высокой коррозионной стойкости.

В зависимости от количественного содержания примесей, различают пять основных марок технической меди: М0 – с суммарным содержанием примесей не более 0,05 %; М1 – не более 0,10 %; М2 – не более 0,30 %; М3 – не более 0,50 %; М4 – не более 1,00 %.

Кислород растворим в твердой меди. При повышении температуры медь активно окисляется, образуя оксид (закаись) меди  $\text{Cu}_2\text{O}$ , который при затвердевании образует с медью эвтектику  $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$ . Располагаясь по границам зерен, эвтектика снижает коррозионную стойкость и пластичность шва.

Водород хорошо растворяется в жидкой меди. В затвердевшем металле растворимость водорода незначительна. С повышением температуры растворимость водорода возрастает, особенно при переходе в жидкое состояние. Азот имеет малое сродство к меди и нерастворим в ней.

Насыщение металла шва газами может быть предпосылкой к образованию пористости. Водяные пары, накапливаясь в микродефектах металла, создают в них давление, разрушающее металл с образованием микротрещин. Это явление носит название водородной болезни меди.

При сварке меди металл шва характеризуется крупнозернистостью с резким изменением структуры на границе сплавления. Степень укрупнения зерен в ЗТВ определяется количеством тепла, введенном в основной металл.

Большие тепло- и температуропроводность меди создают высокие градиенты температуры и скорости охлаждения. Это обуславливает необходимость применения повышенной погонной энергии при сварке меди по сравнению со сталями или применения предварительного подогрева изделия.

Одна из главных задач технологии сварки меди заключается в том, чтобы не допустить образования и нейтрализовать вредное влияние оксида  $\text{Cu}_2\text{O}$ . С этой целью для защиты используют инертный газ, флюсы и покрытия, содержащие борные соединения (бура, борный ангидрид, борная кислота), и сварочные проволоки с активными раскислителями, например, проволоку БрКМцЗ-1, содержащую кремний и марганец и др.

Алюминиевые сплавы используют в сварных конструкциях различного назначения. Основными достоинствами их как конструкционных материалов являются малая плотность, высокая удельная прочность.

Алюминиевые сплавы разделяют на литейные и деформируемые. В сварных конструкциях в основном используют полуфабрикаты из деформируемых сплавов. Деформируемые сплавы разделяют на сплавы, не упрочняемые термической обработкой, и сплавы, упрочняемые термической обработкой.

К деформируемым сплавам, не упрочняемым термической обработкой, относятся технический алюминий АД, алюминиево-марганцевый сплав АМц и группа сплавов системы Al–Mg. В сварных соединениях эти сплавы способны сохранять до 95 % прочности основного металла.

Термически упрочняемые деформируемые алюминиевые сплавы могут быть разделены на несколько групп.

- 1 Дуралюмины – сплавы на основе системы Al–Cu–Mg.
- 2 Авиали – сплавы на основе системы Al–Mg–Si и Al–Cu–Mg–Si.
- 3 Сплавы на основе системы Al–Cu–Mg–Fe–Ni: АК2, АК4, АК4-1.
- 4 Сплавы на основе системы Al–Cu–Mn: Д20, Д21, ВАД.
- 5 Сплавы на основе системы Al–Zn–Mg–Cu: В93, В95, В96, В94.
- 6 Сплавы на основе системы Al–Mg–Zn: В92, В92Ц, АЦМ.

Из перечисленных сплавов к свариваемым относятся: АД, АД1, АМц, АМг, АМг3, АМг5В, АМг6, АВ, АД31, АД33, АД35, М40, Д20, ВАД1, В92Ц.

Окисная пленка на поверхности алюминия и его сплавов затрудняет процесс сварки. Обладая высокой температурой плавления ( $2050\text{ }^\circ\text{C}$ ), окисная пленка не расплавляется в процессе сварки и покрывает металл прочной оболочкой, затрудняющей образование общей ванны. Вследствие высокой адсорбционной способности к газам и парам воды окисная пленка является источником газов. Частицы окисной пленки, попавшие в ванну, а также часть



пленок с поверхности основного металла, не разрушенных в процессе сварки, могут образовывать окисные включения в швах.

Для осуществления сварки должны быть приняты меры по разрушению и удалению пленки и защите металла от повторного окисления. С этой целью используют специальные сварочные флюсы или сварку осуществляют в атмосфере инертных защитных газов. Действие флюсов для сварки алюминия основано на процессах растворения и смывания диспергированной окисной пленки расплавленным флюсом. В условиях электродуговой сварки в инертных защитных газах удаление окисной пленки происходит в результате электрических процессов, происходящих у катода (катодное распыление).

При подготовке деталей из алюминиевых сплавов под сварку профилируют свариваемые кромки, удаляют поверхностные загрязнения и окислы. Окисную пленку можно удалять с помощью металлических щеток. После зачистки кромки вновь обезжиривают растворителем.

Водород, в отличие от других газов, обладает способностью растворяться в алюминии и при определенных условиях образовывать поры в металле швов. Основной мерой борьбы с пористостью при сварке алюминия является снижение концентрации растворенного в нем водорода до предела ниже  $0,69 \dots 0,7 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  металла. Основным источником водорода, растворяющегося в металле шва при аргонодуговой сварке, является влага, адсорбированная поверхностью металла и входящая в состав окисной пленки в виде гидратированных окислов.

Титан – тускло-серый металл с температурой плавления  $1668 \text{ }^\circ\text{C}$ , коррозионно стоек при нормальной температуре даже в сильных агрессивных средах, но очень активен при нагреве выше  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ . В кислороде способен к самовозгоранию. Бурно реагирует с азотом. Окисляется водяным паром, углекислым газом, поглощает водород. Теплопроводность титана более чем в 2 раза ниже, чем у углеродистой стали. Поэтому при сварке титана, несмотря на его высокую температуру плавления, требуется меньше тепла.

Титан может находиться в виде двух основных стабильных фаз, отличающихся строением кристаллической решетки. При нормальной температуре он существует в виде  $\alpha$ -фазы с мелкозернистой структурой, не чувствительной к скорости охлаждения. При температуре выше  $882 \text{ }^\circ\text{C}$  образуется  $\beta$ -фаза с крупным зерном и высокой чувствительностью к скорости охлаждения. Легирующие элементы и примеси могут стабилизировать  $\alpha$ -фазу (алюминий, кислород, азот) или  $\beta$ -фазу (хром, марганец, ванадий). Поэтому сплавы титана условно разделяют на три группы:  $\alpha$ -, ( $\alpha + \beta$ )- и  $\beta$ -сплавы. Первые (BT1, BT5-1) термически не упрочняются, пластичны, обладают хорошей свариваемостью. Вторые (OT4, BT3, BT4, BT6, BT8) при малых добавках  $\beta$ -стабилизаторов также свариваются хорошо. Они термически обрабатываются. Сплавы с  $\beta$ -структурой, например BT15, BT22, упрочняются термообработкой. Они свариваются хуже, склонны к росту зерен и к холодным трещинам.

При сварке титана зона сварки, ограниченная изотермой  $350 \text{ }^\circ\text{C}$ , должна быть тщательно защищена от взаимодействия с воздухом путем сварки в среде

инертных защитных газов (аргона или гелия) высокой чистоты, под специальными флюсами, в вакууме.

Все титановые сплавы не склонны к образованию горячих трещин, но склонны к сильному укрупнению зерна в металле шва и околошовной зоне, что ухудшает свойства металла.

Шов на титановых сплавах имеет крупнокристаллическую дендритную структуру. При сварке под флюсом структура несколько модифицирована натрием, переходящим из флюса в очень малых количествах, и поэтому размер кристаллитов меньше, чем при сварке в инертных газах.

## ***5.2 Оборудование, приборы и материалы***

5.2.1 Установка для полирования шлифов.

5.2.2 Металлографический микроскоп.

5.2.3 Набор шлифов сварных соединений из цветных металлов.

5.2.4 Материалы, необходимые для полировки.

5.2.5 Набор реактивов для травления шлифов из цветных металлов.

## ***5.3 Порядок проведения работы***

5.3.1 Визуально исследовать микрошлифы с целью выявления расположения металла шва, его микроструктуры.

5.3.2 С помощью микроскопа ознакомиться со структурой наплавленного металла на ЗТВ, основного металла.

5.3.3 Зарисовать структуру исследованных участков сварного соединения и площади круга диаметром 40 мм.

## ***5.4 Содержание отчета***

5.4.1 Название и цель работы.

5.4.2 Рабочее задание.

5.4.3 Схема формирования структуры ЗТВ.

5.4.4 Рисунки шлифов и рисунки исследованных участков ЗТВ с описанием структур.

5.4.5 Выводы по работе.

## ***Контрольные вопросы***

1 Как определяется структура наплавленного металла при сварке цветных металлов?

2 В чем заключается изменение структуры и свойств меди в ЗТВ при сварке?

3 Каковы особенности структуры в ЗТВ при сварке алюминия и его сплавов?

4 Какие структурные превращения происходят при сварке титана и его сплавов?

5 Как регулировать размеры участка роста зерна?

## 6 Лабораторная работа № 6. Исследование образования пор

**Цель работы:** изучить механизм порообразования в сварных швах и способы борьбы с пористостью.

### 6.1 Общие теоретические сведения

Порами называются газовые пустоты в металле шва. Поры образуются в период кристаллизации сварочной ванны. Причиной их образования является выделение газов жидкого металла вследствие следующих процессов:

1) выделения газов, преимущественно водорода или азота, из раствора вследствие скачкообразного изменения растворимости при переходе из жидкого состояния в твердое;

2) реакций в жидкой ванне, протекающих с образованием нерастворимых в металле газообразных продуктов:  $[C] + [O] = CO$ ,  $2[H] + [O] = H_2O$ .

Пористость является конечным результатом прохождения в жидком металле сложных металлургических процессов, основными из которых являются:

- образование устойчивых газовых зародышей;
- рост газовых зародышей из-за диффузии в них газов;
- всплывание образующихся газовых пузырьков на поверхность ванны (рисунок 6.1).

Вероятность образования устойчивого газового зародыша с энергетической точки зрения описывается уравнением

$$W = C \cdot \exp \frac{F}{kT},$$

где  $C$  – постоянная;

$F$  – изменение свободной энергии при образовании зародыша;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – температура.

Расчеты по формуле и экспериментальные данные показывают, что вероятность образования газового зародыша в «прозрачной» жидкости без готовых газовых включений весьма мала. Поэтому газовые зародыши в сварочной ванне образуются преимущественно на готовых поверхностях раздела: поверхности оплавленного металла, поверхности растущих кристаллов, поверхности твердых частиц в жидком металле. Важную роль играет смачиваемость этой поверхности жидким металлом: чем хуже смачивание, тем легче образуется газовый зародыш на границе раздела.

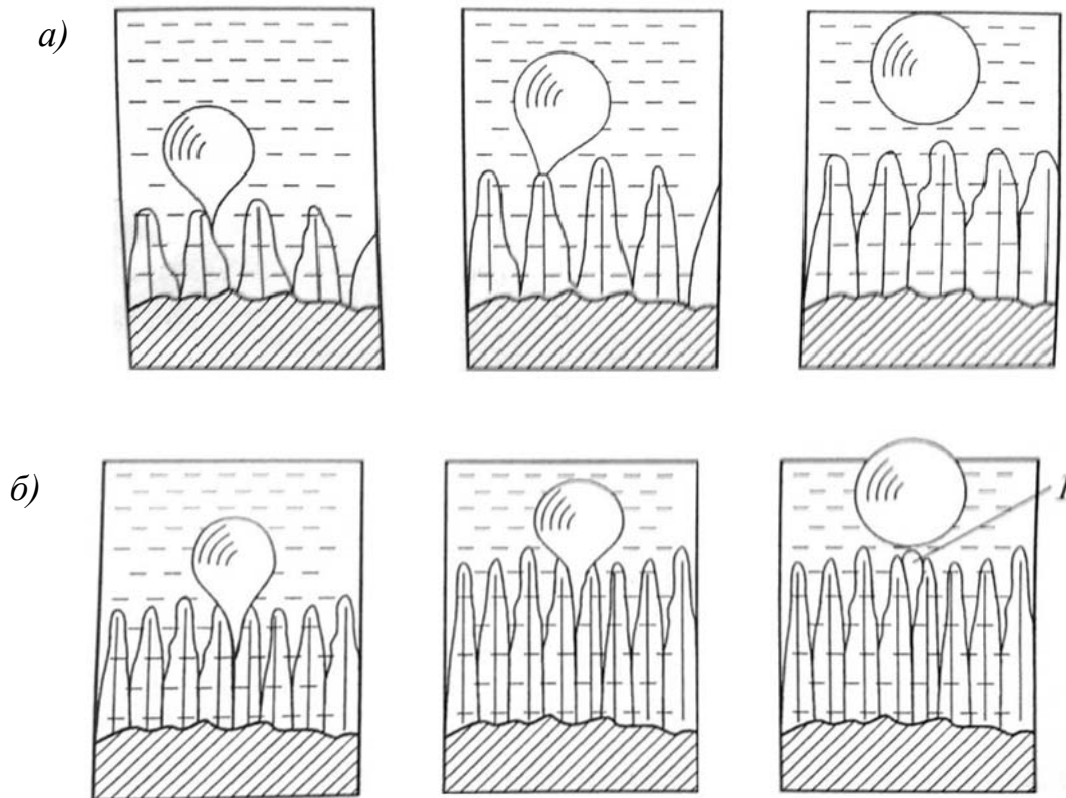


Рисунок 6.1 – Схема формирования газового пузырька и его отрыва от фронта кристаллизации металла шва при малой (а) и большой (б) скоростях сварки (1 – остаток газового пузырька внутри металла)

Для того чтобы газовый зародыш рос, необходимо, чтобы давление газа в нем достигало такой величины, которая способна преодолеть атмосферное давление, давление столба металла, столба шлака и силы поверхностного натяжения:

$$P = \gamma_m \cdot h_m + \gamma_{ш} \cdot h_{ш} + P_{ат} + \frac{2\sigma}{r},$$

где  $r$  – радиус газового пузырька;

$\sigma$  – поверхностное натяжение на границе фаз;

$P_{ат}$  – атмосферное давление;

$\gamma_{ш}$  – плотность шлака;

$\gamma_m$  – плотность металла;

$h_{ш}$  – высота слоя шлака над пузырьком;

$h_m$  – высота слоя металла над пузырьком.

Давление внутри пузыря  $P$  складывается из суммы парциальных давлений отдельных газов, диффундирующих в пузырях:

$$P = P_{H_2} + P_{CO} + P_{H_2O} + \dots$$

Среди всех газов особая роль в образовании пористости принадлежит водороду.

Давление газа в пузырьке зависит от степени насыщенности этим газом металла. Например, для выделения из раствора в пору водорода можно записать константу равновесия и из нее определить парциальное давление водорода:

$$K_P = \frac{P_{H_2}}{[H]^2};$$

$$P_{H_2} = K \cdot [H]^2.$$

Не все газовые пузырьки, образующиеся в жидкости, дают поры в закристаллизовавшемся металле. Часть из этих пузырьков успевает всплыть на поверхность ванны. Чем больше размер пузырька, тем более энергично он всплывает на поверхность ванны. Скорость всплывания пузырьков определяется по формуле

$$V = \frac{2r^2}{9} \cdot \frac{\gamma_M \cdot g}{\eta},$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;

$\eta$  – кинематическая вязкость жидкости.

Можно оценить, какие пузырьки всплывут на поверхность ванны и какие образуют поры.

Время нахождения ванны в расплавленном состоянии

$$t = \frac{L_{\text{ВАННЫ}}}{V_{\text{св}}}.$$

За это время пузырьки должны пройти путь, равный глубине ванны  $h$ :

$$h = Vt.$$

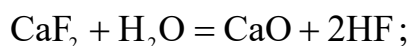
Поры не образуются, если

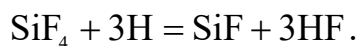
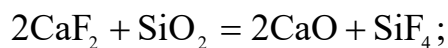
$$\frac{L}{V} > \frac{h}{\frac{2r^2}{9} \cdot \frac{\gamma_M \cdot g}{\eta}}.$$

Эта формула является основной для анализа влияния режимов сварки на пористость швов.

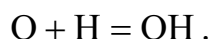
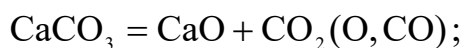
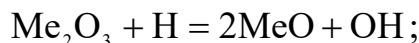
Металлургические способы борьбы с пористостью направлены на связывание водорода в сварочной дуге в нерастворимые в металле соединения.

Водород может связываться в HF по реакциям





Для осуществления данных реакций во флюс вводится  $\text{CaF}_2$  и  $\text{SiO}_2$ . Может применяться также связывание водорода в гидроксил:



Связывание водорода в гидроксил осуществляется путем введения в керамический флюс высших окислов (например, окислов железа, марганца) или мрамора.

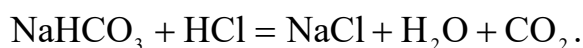
Керамические флюсы отличаются высокой стойкостью против образования пор даже при сварке по ржавому металлу.

## ***6.2 Оборудование, приборы и материалы***

- 6.2.1 Специальный парафинированный стакан.
- 6.2.2 Весы с миллиграммовым разновесом.
- 6.2.3 Сварочный пост постоянного тока для ручной сварки.
- 6.2.4 Раствор соляной кислоты и пищевой соды.
- 6.2.5 Пластина размером  $300 \times 400 \times 15$  с канавками.
- 6.2.6 Флюс АН-348А.
- 6.2.7 Проволока Св-08 или Св-08А.
- 6.2.8 Ржавчина.
- 6.2.9 Электроды УОНИИ 13/45.

## ***6.3 Порядок проведения работы***

6.3.1 Исследовать образование газовых зародышей. Стакан, часть внутренней поверхности которого парафинирована, заполнить раствором соляной кислоты. Затем в стакан добавить некоторое количество кислого углекислого натрия  $\text{NaHCO}_3$  (пищевой соды). Происходит реакция по уравнению



Внутри стакана начинается интенсивное образование пузырьков углекислого газа.

Дать оценку образованию газовых пузырьков на парафинированной и непарафинированной части стакана.

6.3.2 Исследовать рост газовых пузырьков и влияния на него насыщения сварочной ванны газами.

6.3.2.1 В канавки на поверхности металла, размеченные на участки длиной по 100 мм, насыпать строго дозированные количества ржавчины (0, 200, 400, 600 и 800 мг) и равномерно распределить по длине канавки. В канавке произвести наплавку под флюсом АН-348А на переменном токе. После удаления шлака визуально определить, при каком количестве ржавчины на 100 мм длины шва начинается порообразование.

6.3.3 Влияние на порообразование условий всплывания газовых пузырьков на поверхность ванны.

Условия всплывания газовых пузырьков и освобождение от них металла ванны могут регулироваться за счет изменения режимов сварки.

#### ***6.4 Содержание отчета***

6.4.1 Цель работы.

6.4.2 Рабочее задание.

6.4.3 Рисунок стаканчика с газовыми пузырьками.

6.4.4 Рисунок пластины с указанием мест насыпания ржавчины.

6.4.5 Результаты экспериментов.

6.4.6 Выводы.

#### ***Контрольные вопросы***

1 Каким образом можно подавить пористость за счет управления процессом образования газовых зародышей?

2 Какими профилактическими мерами воздействия на основные и вспомогательные материалы можно уменьшить пористость?

3 Какие параметры режима сварки рациональнее изменять для уменьшения пористости?

4 Как изменяется растворимость азота и водорода в металле в зависимости от температуры?

### **7 Лабораторная работа № 7. Исследование механизма образования соединений при холодной сварке**

***Цель работы:*** исследовать механизм образования сварного соединения при холодной сварке.

#### ***7.1 Общие теоретические сведения***

Для получения качественного сварного соединения методами холодной сварки атомы металла у поверхности соприкосновения соединяемых деталей необходимо сближать на такое расстояние, на котором оно находится внутри металла.

Реальная поверхность твердого тела, как бы тщательно она не была обработана, имеет микронеоднородности и шероховатости. Всегда на поверхности имеются трудноудаляемые адсорбционные слои газов.

Только при полном отсутствии на поверхности металла чужеродных атомов поверхность можно считать ювенильной или физически чистой. Таковую поверхность можно получить при разрушении металла. Ювенильные поверхности обладают особыми химическими и каталитическими свойствами. При соприкосновении ювенильных поверхностей со средой или низким вакуумом начинается ее мгновенное химическое воздействие: окисление, адсорбция и др.

При наличии атмосферы любого состава и давления ювенильная поверхность мгновенно покрывается слоями адсорбированных газов и молекул.

В реальных условиях поверхность металла имеет сложную систему адсорбционных слоев. Обычно над поверхностью находятся слои окислов, прочно связанные с металлом.

На внешней поверхности могут также присутствовать адсорбционные слои полярных молекул органических веществ (смазка, масло). Жировые слои могут достигать значительных размеров. Например, после промывки металла с масляным покрытием керосином или бензином слой органических молекул составляет 1...5 мкм и только при особо значительной обработке растворителями жировая пленка уменьшается до 10...100 молекулярных слоев.

Для выполнения холодной сварки весьма существенно состояние соединяемых поверхностей. Они должны быть предварительно механически обработаны для устранения неровностей. Небольшие неровности удалять необязательно, они могут быть даже полезны для ранней стадии сварки, т. к. создают местные концентрации напряжений и начальные центры схватывания. Поэтому особенно тщательно готовить детали не следует, достаточно обычной шлифовки.

## ***7.2 Оборудование, приборы и материалы***

7.2.1 Приспособление для холодной сварки.

7.2.2 Штангенциркуль.

7.2.3 Проволока диаметром 3 мм – медь МЗ и алюминий А.

## ***7.3 Порядок проведения работы***

7.3.1 Зачистить образцы из алюминия или меди разными способами: наждачной бумагой, напильником, вращающейся стальной щеткой и др.

7.3.2 Произвести сварку серий образцов встык в приспособлении для холодной сварки. При сварке варьировать степень осадки.

7.3.3 Сваренные образцы разрушить на разрывной машине, измеряя усилие разрушения.

7.3.4 Построить зависимость величины разрушающего усилия от степени пластической деформации.

7.3.5 Объяснить полученные результаты.



## **7.4 Содержание отчета**

7.4.1 Цель работы.

7.4.2 Рабочее задание.

7.4.3 Краткое описание исследуемого способа холодной сварки.

7.4.4 Схема устройства для сварки.

7.4.5 Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1 Какова роль пластических деформаций в образовании соединения?

2 Как получаются чистые поверхности в процессе сварки?

3 Почему прочность соединения зависит от степени пластической деформации?

## **8 Лабораторная работа № 8. Исследование технологической прочности металла в процессе кристаллизации**

**Цель работы:** ознакомиться с механизмами образования горячих трещин и методами определения склонности к образованию горячих трещин.

### **8.1 Общие теоретические сведения**

Под термином «горячие трещины» понимают хрупкие межкристаллитные разрушения в процессе кристаллизации металла. Горячие трещины являются одним из распространенных дефектов сварки металлургического происхождения и наиболее часто возникают в сплавах, затвердевание которых заканчивается однофазным крупнокристаллическим строением с высокой концентрацией легкоплавких фаз, и других дефектов кристаллического строения по границам кристаллов.

Современная теория образования горячих трещин основана на сопоставлении интенсивности нарастания деформаций, возникающих в металле при сварке, с изменением его деформационной способности.

В процессе сварки кристаллизующийся и остывающий металл находится под воздействием растягивающих напряжений, возникающих и развивающихся в сварном соединении вследствие несвободной усадки шва и прилегающих участков неравномерно нагретого основного металла. Поэтому металл шва в процессе кристаллизации подвергается пластической деформации.

Кристаллизующийся металл сварочной ванны последовательно проходит стадии жидкого, жидко-твердого, твердо-жидкого и твердого состояний. Пластичность жидкого металла велика. По мере увеличения соотношения между объемом твердой и жидкой фазы пластичность металла падает вследствие образования жесткого каркаса кристаллитов и прекращения свободной циркуляции жидкости.

В твердо-жидком состоянии пластичность металла весьма мала. Интервал температур, в котором пластичность металла пониженная, носит название температурного интервала хрупкости (ТИХ). Деформация металла в ТИХ приводит к хрупкому разрушению по межкристаллическим прослойкам, в которых еще не закончен процесс кристаллизации.

Деформация металла определяется величиной усадки кристаллизующегося металла и величиной усадки прилегающих участков основного металла. В зависимости от форм, размеров и жесткости сварного соединения, а также режимов и технологии сварки, величина деформации металла к концу процесса кристаллизации может быть меньше, равной либо больше величины. В последних двух случаях образование кристаллизационных трещин будет неизбежным.

В некоторых сплавах возможно существование нескольких температурных интервалов хрупкости ТИХ. ТИХ I находится в нижней части интервала кристаллизации и характерен для всех сплавов. ТИХ II, ТИХ III существуют у некоторых сплавов в твердофазном состоянии металла при температурах ниже температуры неравновесного солидуса.

Горячие трещины в ТИХ I образуются по жидким прослойкам в период завершения кристаллизации шва, а также в околошовной зоне по оплавленным границам в период нагрева. Горячие трещины такого типа называются кристаллизационными или ликвационными трещинами.

Горячие трещины в ТИХ II образуются в закристаллизовавшихся шве и околошовной зоне в период интенсивного развития процессов самодиффузии атомов основы и миграции границ зерен. В результате этих процессов происходит межзеренное проскальзывание и зарождение горячих микротрещин. Горячие трещины такого типа называются подсолидусными или полигонизационными трещинами. Полигонизационные горячие трещины образуются ниже температуры солидуса, когда металл уже закристаллизовался. При этих температурах происходит процесс образования новых границ зерен (полигонизация) вследствие перемещения в определенные места несовершенств кристаллической решетки.

Горячие трещины в ТИХ III образуются в результате охрупчивания, обусловленного распадом твердого раствора с выпадением мелкодисперсных интерметаллидных и карбонитридных фаз (например, фазы  $Ni_3TiAl$  в высоконикелевых сплавах). Дисперсионное упрочнение объема зерен приводит к локализации пластических деформаций по приграничным участкам и относительному проскальзыванию зерен и зарождению горячих микротрещин. Такие горячие трещины называются трещинами дисперсионного твердения.

Стойкость сварных соединений против образования горячих трещин может быть оценена различными методами. По назначению их разделяют на две категории:

- 1) методы для оценки сопротивляемости сплавов образованию горячих трещин безотносительно к типу и размерам образцов;

- 2) методы для оценки стойкости или склонности к образованию горячих трещин при заданном составе сплава и режиме сварки.

Расчетно-статистический метод оценки склонности металла к образованию горячих трещин при сварке основан на использовании параметрических уравнений, составленных с помощью регрессионного анализа. Одно из параметрических уравнений (по Итамуре) применительно к низколегированным сварным швам имеет вид:

$$HCS = C \left( S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right) \cdot \frac{1000}{3Mn + Cr + Mo + V},$$

где  $HCS$  (high-temperature cracking sensitivity) – параметр, оценивающий (в баллах) склонность сварных швов к образованию кристаллизационных горячих трещин;

$C$ ,  $S$  и др. – содержание химических элементов (в процентах) в металле шва.

Если  $HCS > 4$ , то сварные швы потенциально склонны к образованию горячих трещин. Это означает, что в условиях высокого темпа сварочной деформации в ТИХ I возможно образование горячих трещин. Параметр  $HCS$  позволяет качественно оценивать влияние легирующих элементов и примесей на сопротивляемость металла шва образованию горячих трещин.

Применительно к хромоникелевым аустенитным сварным швам используют параметр, оценивающий степень их аустенитности:

$$Cr_3 = Cr + 1,37 \cdot Mo + 1,5 \cdot Si + 2 \cdot Nb + 3 \cdot Ti;$$

$$Ni_3 = Ni + 22 \cdot C + 0,3 \cdot Mn + 14,2 \cdot N_2 + Cu,$$

где  $Cr_3$  и  $Ni_3$  – параметры, так называемые хром- и никель-эквиваленты;

$Cr$ ,  $Ni$  и др. – содержание химических элементов, % ( $S$  и  $P \leq 0,035$  %).

Если  $Cr_3 / Ni_3 < 1,5$ , то сварные швы потенциально склонны к образованию кристаллизационных горячих трещин. Если  $Cr_3 / Ni_3 > 1,5$ , то вероятно появление в аустенитном шве ферритной фазы, которая приводит к образованию мелкокристаллитной первичной структуры шва, изменению состава межкристаллитных жидких прослоек и в результате – к увеличению минимальной пластичности.

Прямые методы определения склонности металла к образованию горячих трещин могут предусматривать оценку по длине трещины или по критическому темпу деформации.

Критерием устойчивости сплавов против образования горячих трещин может быть критическая скорость растяжения в ТИХ, при которой еще не образуются трещины. В машине ММИ-2 образцы подвергаются растяжению в процессе сварки.

## 8.2 Оборудование, приборы и материалы

8.2.1 Установка для определения склонности к образованию горячих трещин ММИ-2.

8.2.2 Сварочный пост для ручной сварки, автомат для сварки под флюсом.

8.2.3 Электроды различных марок (АНО-1, ОЗС-3, АНО-5, УОНИИ-13/45).

8.2.4 Графитовый порошок, сернистое железо.

### **8.3 Порядок проведения работы**

8.3.1 Задание по работе выдается преподавателем.

8.3.2 Определить влияние на технологическую прочность содержания серы и углерода в шве.

8.3.3 Сравнительное испытание на технологическую прочность электродов различных марок.

### **8.4 Содержание отчета**

8.4.1 Цель работы.

8.4.2 Рабочее задание.

8.4.3 Схема проведения эксперимента.

8.4.4 Результаты эксперимента.

8.4.5 Выводы.

### **Контрольные вопросы**

1 Назовите причины образования горячих трещин.

2 Что называют температурным интервалом хрупкости?

3 В чем заключаются особенности кристаллизации металла сварочной ванны?

4 Как образуются полигонизационные трещины?

5 Как оценивают стойкость сварных соединений против образования горячих трещин?

6 Перечислите и опишите способы борьбы с горячими трещинами.

## **9 Лабораторная работа № 9. Исследование свариваемости сталей, склонных к закалке**

**Цель работы:** изучить влияние режимов сварки и последующей термообработки стали 30ХГСА на твердость металла околошовной зоны.

### **9.1 Общие теоретические сведения**

Термические циклы отдельных точек зоны термического влияния (ЗТВ), находящиеся на различных расстояниях от шва, неодинаковы, поэтому сварное соединение обладает неоднородной структурой и различными свойствами отдельных участков.

Характер получаемых структур в ЗТВ зависит от состава свариваемого металла, а также примененного теплового режима при сварке.

Повышенное количество в металле таких примесей, как углерод, хром, никель, марганец, молибден и других, увеличивает стойкость аустенита, вследствие чего его распад может быть при температурах ниже точки  $A_{c1}$ . О характере получаемых при этом структур можно приблизительно судить по диаграмме изотермического распада аустенита данной стали. Если этот распад протекает в верхнем субкритическом интервале температур ( $T_{A1}-T_{\min}$ ), продуктами распада могут быть перлит-сорбит-троостит. Этому отвечает скорость охлаждения металла, менее или равная критической  $W_{кр}$ .

Распад же переохлажденного аустенита ниже этих температур дает присутствие игольчатых структур в том или ином количестве, а при температуре  $T_m$  наблюдается мартенситное превращение.

Структура мартенсита является одной из причин появления холодных трещин в околошовной зоне.

При расчете режима сварки следует рассчитывать на такую скорость охлаждения металла околошовной зоны, которая была бы менее критической. Это достигается замедлением скорости охлаждения металла.

Из термокинетической диаграммы распада аустенита стали 30ХГСА можно определить температуру, отвечающую критической точке  $A_{c1}$ , температуру наименьшей устойчивости аустенита  $T_{\min}$  и отвечающую этому времени  $t_{\min}$ , а следовательно, обосновать расчетом тепловой режим при сварке этой стали.

## **9.2 Оборудование, приборы и материалы**

9.2.1 Сварочный трактор АДГ-601 с питанием от источника постоянного тока.

9.2.2 Пластина из стали 30ХГСА размером 200×160×10 мм – 2 шт.

9.2.3 Электродная проволока Св-10Х2СМА (Св-08Г2С).

9.2.4 Муфельная печь для нагрева образцов с термопарой.

9.2.5 Лентопильный станок.

9.2.6 Микроскоп металлографический.

9.2.7 Твердомер.

## **9.3 Порядок проведения работы**

9.3.1 *Расчетная часть.*

Для оценки свариваемости стали 30ХГСА определяется эквивалент по углероду для данной стали в соответствии с формулой

$$C_{\text{экр}} = \%C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr}}{5} + \frac{\text{V}}{5} + \frac{\text{Mo}}{4} + \frac{\text{Ni}}{15} + \frac{\text{Cu}}{13} + \frac{\text{P}}{2} .$$

По полученному значению  $C_{\text{экр}}$  делается общее заключение по свариваемости стали 30ХГСА. При  $C_{\text{экр}} = 0,45\%$  сталь склонна к образованию трещин.

С помощью термокинетической диаграммы распада аустенита стали 30ХГСА производится определение критической скорости охлаждения металла по формуле

$$W = \frac{T_{A1} - T_{\min}}{t_{\min}}.$$

По применяемому для сварки режиму (режим сварки выдается преподавателем) определяется скорость охлаждения околошовной зоны при температуре наименьшей устойчивости аустенита.

Для этого сначала определяется безразмерный критерий процесса

$$\frac{1}{\theta} = \frac{2 \cdot q / v}{\pi \cdot c\gamma \cdot \delta^2 (T_{\min} - T_0)},$$

где  $c\gamma$  – объемная теплоемкость для стали 30ХГСА;

$\delta$  – толщина образца;

$q/v$  – исследуемая погонная энергия;

$T_0$  – начальная температура образца,  $T_0 = 20$  °С.

Если  $\theta$  окажется менее 2,5, то для схемы тела «плоский слой» определяется  $v/\theta$ , а если окажется равной или более 2,5, тогда определение  $V/\theta$  производится по схеме «тонкая пластина».

Скорость охлаждения в околошовной зоне

$$W = \frac{v}{\theta} \cdot \frac{2\pi\lambda(T_{\min} - T_0)^2}{q/v},$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности для стали 30ХГСА.

Сначала производим расчет скорости охлаждения околошовной зоны для случая наплавки валика на пластину без предварительного нагрева ( $T_0 = 20$  °С).

Полученное значение  $W$  сопоставляется с критической скоростью охлаждения для данной стали  $W_{кр}$ .

Если расчетная скорость охлаждения будет больше критической, необходимо отрегулировать термический цикл сварки в целях получения в околошовной зоне достаточно пластических структур. Повышая одновременно погонную энергию и задаваясь предварительным нагревом, т. е. замедляя охлаждение металла, следует получить  $W < W_{кр}$ .

### 9.3.2 Экспериментальная часть.

Производится автоматическим способом наплавка валика на образец на двух режимах сварки, задаваемых преподавателем. Сведения о режимах заносятся в таблицу 9.1.

Таблица 9.1 – Режимы сварки

Номер режима	Диаметр проволоки, мм	Ток, А	Напряжение, В	Скорость сварки, см/с	Погонная энергия, Дж/см	Примечание

## **9.4 Содержание отчета**

9.4.1 Название и цель работы.

9.4.2 Рабочее задание.

9.4.3 Схема измерения твердости.

9.4.4 Эскизы шлифов и их описание.

9.4.5 Описание влияния термообработки и режимов сварки на свойства сварных соединений.

9.4.6 Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1 Что такое эквивалент по углероду?

2 Какое строение имеет ЗТВ при сварке сталей, склонных к закалке?

3 Что такое мартенсит?

4 Как определяется мгновенная скорость охлаждения околошовной зоны?

## **10 Лабораторная работа № 10. Исследование содержания водорода в наплавленном металле**

**Цель работы:** овладеть методикой определения диффузионно-подвижного водорода в металле сварного соединения.

### **10.1 Общие теоретические сведения**

Водород в металл сварного соединения переходит из сварочных материалов, атмосферы дуги и вследствие термодиффузии из менее нагретых зон основного металла.

Максимальная растворимость водорода в жидком железе наблюдается при температуре 2450 °С и составляет при нормальном давлении 405 см<sup>3</sup> на килограмм металла.

При температуре плавления растворимость водорода находится в пределах 280...266 см<sup>3</sup>/кг.

В твердом металле водород может быть атомарным (или ионизированным) решеточным, растворенным в кристаллической решетке до предела растворимости; атомарным, решеточным неравновесным, растворенным в кристаллической решетке сверх предела растворимости; атомарным в субмикроскопических ловушках; молекулярный в микро- и макроколлекторах, причем ловушками атомарного водорода являются скопления вакансий и дислокаций, плоскости сдвига, границы зерен и блоков.

Газовые поры, полости около неметаллических включений и карбидов, другие микроскопические дефекты являются коллекторами молекулярного водорода.

При изменении температуры различные формы пребывания водорода в металле переходят друг в друга.

В зависимости от диффузионной подвижности водорода в металле различают:  $H_{дн}$  – диффузионно-подвижный водород;  $H_{кн}$  – водород, способный к диффузии при градиентах температур и концентрации напряжений;  $H_{дс}$  – водород, связанный с дефектами структуры и не диффундирующий в металле.

$H_{дн}$  включает все формы атомарного решеточного водорода ( $H$ ,  $H^+$ ,  $H^-$ ). Поскольку всегда существует градиент концентраций водорода на поверхности металла, то имеет место непрерывный выход водорода в атмосферу.

Через определенный период времени практически весь водород должен десорбироваться из металла. Свободно выделившийся водород ( $H_2$ ) приближенно принимают за исходное содержание  $H_{дн}$ . Часть  $H_{дн}$ , не успевшая выделиться из металла, и  $H_{дс}$  составляют остаточный водород  $H_{ост}$ .

## ***10.2 Оборудование, приборы и материалы***

10.2.1 Сварочный пост ручной дуговой сварки.

10.2.2 Приспособление для получения «карандашных проб».

10.2.3 Прибор для определения диффузионно-подвижного водорода.

10.2.4 Глицерин 0,5 л.

10.2.5 Пластины с отверстиями толщиной 3 мм.

10.2.6 Сварочные электроды.

## ***10.3 Порядок проведения работы***

По указанию преподавателя ручной дуговой сваркой электродами различных марок наплавить валик на пластину. Образцы охладить водой, сбить шлак, насухо вытереть и поместить в эвдиометр. На следующем занятии измеряют объемы водорода, выделившиеся из образцов, обрабатывают результаты экспериментов, делают выводы, объясняющие их.

## ***10.4 Содержание отчета***

10.4.1 Название и цель работы.

10.4.2 Схема лабораторной установки.

10.4.3 Выводы по работе.

## ***Контрольные вопросы***

1 Как влияет содержание водорода в металле на его свойства?

2 Роль водорода в образовании холодных трещин.

3 Источники попадания водорода в металл сварного соединения.

4 Формы пребывания водорода в металле сварных соединений и его миграция.



## **11 Лабораторная работа № 11. Исследование образования холодных трещин**

**Цель работы:** освоение методики определения чувствительности к образованию холодных трещин при сварке закаливающихся сталей.

### ***11.1 Общие теоретические сведения***

Холодные трещины – локальные межкристаллические разрушения металла сварных соединений. Основными факторами, обуславливающими возникновение трещин, являются:

- структурное состояние металла сварного соединения, характеризующее наличием структурных составляющих мартенситного и бейнитного типа;
- уровень растягивающих сварочных напряжений, определяемый жесткостью сварной конструкции, режимом сварки, типом металла шва и другими причинами;
- содержание и распределение водорода в металле сварного соединения после сварки, зависящее от концентрации водорода в атмосфере дуги.

Холодные трещины являются одним из случаев замедленного разрушения «свежезакаленной» стали. Закономерности замедленного разрушения следующие:

- разрушение возникает после некоторого инкубационного периода при деформировании с малыми скоростями или нагружении постоянной нагрузкой;
- сопротивление разрушению постепенно возрастает с увеличением времени после термического воздействия в результате процесса «отдыха»;
- склонность к замедленному разрушению заметно ослабляется при нагреве до 150 °С и полностью исчезает при нагреве до 200 °С...300 °С.

Для определения склонности сварного соединения к образованию холодных трещин предложены различные технологические пробы. Они почти во всех случаях представляют собой жесткое закрепление свариваемых элементов той или иной формы.

Одной из самых чувствительных проб является крестовая.

### ***11.2 Оборудование, приборы и материалы***

- 11.2.1 Пост ручной дуговой сварки.
- 11.2.2 Металлографический микроскоп.
- 11.2.3 Установка для изготовления шлифов.
- 11.2.4 Электроды с основным типом покрытия.
- 11.2.5 Пластины из закаливающихся сталей.
- 11.2.6 Реактивы для травления шлифов.

### ***11.3 Порядок проведения работы***

Образцы крестовой пробы вырезаются механическим путем. Сварку образца выполняют без зазора с помощью связующих швов. При сварке с помощью термопары контролируется начальная температура пробы.

На первом занятии сваривают пробу. После сварки образцы выдерживают не менее 24 ч. На следующем занятии из пробы вырезают поперечные темплеты. Для контроля с целью определения наличия трещин изготавливаются шлифы. Шлифы травят 2...4-процентным раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Микрошлифы просматривают под микроскопом при увеличении.

Основным качественным критерием склонности к трещинам является факт наличия или отсутствия трещин в образце пробы.

### ***11.4 Содержание отчета***

11.4.1 Название и цель работы.

11.4.2 Описание хода выполнения работы.

11.4.3 Эскиз образца крестовой пробы с указанием порядка наложения слоев.

11.4.4 Режимы сварки, расчетное значение погонной энергии.

11.4.5 Результаты исследования микрошлифов.

11.4.6 Выводы.

### ***Контрольные вопросы***

1 Какие факторы обуславливают возникновение холодных трещин?

2 Какие стали чувствительны к образованию холодных трещин?

3 Каковы критерии чувствительности соединений к образованию холодных трещин при применении крестовой пробы?

4 Какой вид разрушения обнаружен при исследовании микрошлифов?

5 Методы предотвращения образования холодных трещин.

6 Раскройте механизм образования холодных трещин.

## **12 Лабораторная работа № 12. Моделирование техники выполнения сварных соединений на базе симулятора сварочных процессов с использованием дополнительной 3D-реальности**

***Цель работы:*** освоение техники выполнения сварных соединений с использованием симулятора дополнительной 3D-реальности.

### ***12.1 Общие теоретические сведения***

В работе используется обучающая система Soldamatic. Soldamatic – это система обучения посредством «усовершенствованной реальности», которая позволяет сократить затраты и одновременно повысить эффективность обучения в рамках любого курса сварки. Она улучшает процесс образования

студентов и позволяет им получить достаточные навыки перед тем, как начать обучение в условиях реальной мастерской для сварки. Основанный на геймификации данный инструмент облегчает процесс обучения и повышает мотивацию студентов. Использование «усовершенствованной реальности» обеспечивает возможность трансформации физического предмета таким образом, что он ведет себя в соответствии с действиями пользователя, позволяя заметно увеличить время эффективной практики.

Soldamatic является не просто станцией для виртуального тренинга, а целой экосистемой, которая состоит из моделирующих устройств, соединенных в локальную сеть и подключенных к одному серверу.

В платформу встроен обучающий теоретический модуль, который совмещен с выполнением различных упражнений в виртуальном модуле, что значительно увеличивает процент усвоенной теоретической информации.

Форма моделирующего устройства в рамках «дополненной реальности» для обучения Soldamatic навеяна реальным оборудованием для сварки. Поддерживает четыре процесса ручной сварки с использованием электрической дуги. Устройство выполнено на аппаратной базе стационарных ПК, которая позволяет реализовать реалистичную графическую визуализацию процесса сварки. Также имеется встроенный монитор для контроля процесса обучения преподавателем, что позволяет делать поправки в реальном времени.

С помощью шлема «дополненной реальности» ученик получает реалистичные ощущения от виртуального процесса сварки, что реализовано с помощью наложения визуальных эффектов сварки на области горелки и заготовок. На экран шлема выводится информация о параметрах сварочного режима, а также динамические подсказки, позволяющие контролировать правильный дуговой промежуток, положение горелки и скорость ее перемещения.

В комплект поставки оборудования входят две учебные горелки для TIG- и MIG-сварки, выполненные в дизайне марки Abicor Binzel с эргономикой, как у настоящих горелок, использующихся при сварке, а также держатель с электродом для MMA-сварки, который скользит внутри держателя, что позволяет имитировать процесс сгорания электрода.

Также для выполнения упражнений существуют пять стандартных заготовок, имитирующих реальные детали, устанавливаемые под сварку, и опциональный держатель для них.

В тренажере используется программное обеспечение как для моделирования процесса, так и для его анализа и записи статистики, что является очень полезным инструментом для преподавателя.

## ***12.2 Оборудование, приборы и материалы***

12.2.1 Установка для моделирования техники выполнения сварки с дополнительной 3D-реальностью Soldamatic.

12.2.2 Комплект моделей сварных соединений.

12.2.3 Техническая документация.

### ***12.3 Порядок проведения работы***

12.3.1 Ознакомиться с работой установки.

12.3.2 Произвести настройку установки на выполнение сварных соединений в режиме ручной дуговой сварки. Выполнить сварку. Оценить допущенные ошибки. Повторить сварку.

12.3.3 Произвести настройку установки на выполнение сварных соединений в режиме дуговой сварки в среде защитных газов. Выполнить сварку. Оценить допущенные ошибки. Повторить сварку.

### ***12.4 Содержание отчета***

12.4.1 Название и цель работы.

12.4.2 Краткое описание установки.

12.4.3 Выводы.

### ***Контрольные вопросы***

1 Каково основное назначение установки?

2 Преимущества и недостатки обучающего модуля установки.

3 Область применения установки.

## **13 Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ**

Организация лабораторных экспериментов должна проводиться в соответствии с ССБТ ГОСТ 12.4.113–82 *Работы учебные лабораторные. Общие требования безопасности.*

При проведении лабораторных экспериментов должно быть устранено или доведено до безопасных значений величин действие опасных и вредных производственных факторов по ГОСТ 12.0.003–74.

Все производимые в лаборатории работы должны быть организованы так, чтобы полностью исключить образование взрывоопасных концентраций газо-, паро- и пылевоздушных смесей в объеме всего помещения и в отдельных рабочих зонах.

Оборудование, применяемое в учебных лабораториях, должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.003–74 и ГОСТ 12.2.049–80.

Температура поверхности оборудования и трубопроводов, к которым возможны прикосновения людей при проведении лабораторных экспериментов, не должна превышать 45 °С. Системы вентиляции и отопления в лабораторном помещении должны обеспечивать параметры микроклимата в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.005–76.

Предельно допустимая концентрация вредных веществ в воздухе рабочей зоны лаборатории не должна превышать значений, по ГОСТ 12.1.005–76.

Допустимые уровни звукового давления в октавных полосах частот, уровни звука и эквивалентные уровни звука в децибелах на рабочих местах в лаборатории должны соответствовать требованиям ГОСТ 12.1.003–76, относящимся к помещениям лабораторий для проведения экспериментальных работ.

Предельно допустимые напряжённость электрической и магнитной составляющих и плотность тока энергии электромагнитного поля радиочастот на рабочих местах в лаборатории должны соответствовать требованиям ГОСТ 12.1.012–78.

Допустимый уровень вибрации на рабочих местах в лаборатории должен соответствовать требованиям ГОСТ 12.1.012–78. Защитные системы (зануление, защитное заземление, защитное отключение, выравнивание потенциала, двойная изоляция, малое напряжение) и мероприятия по защите от поражения электрическим током в лабораториях должны обеспечивать напряжение прикосновения не выше 42 В – в помещениях без повышенной опасности и с повышенной опасностью, 12 В – в особо опасных помещениях.

Питание лабораторного электрооборудования должно осуществляться от сети напряжением не более 380 В при частоте 50 Гц. В электроустановках должны быть предусмотрены разделительный трансформатор и защитно-отключающее устройство.

Сопротивление изоляции, токоведущих частей электроустановок до первого аппарата максимальной токовой защиты должно быть не менее 0,5 МОм, а сопротивление между заземляющим болтом и каждой доступной прикосновению металлической нетоковедущей частью изделия, которая может оказаться под напряжением, – не более 0,1 Ом.

#### **Требования к размещению оборудования и рабочих мест.**

Размещение оборудования в помещении лаборатории должно обеспечивать удобство выполнения всех видов исследований и работ.

Планировка помещения лаборатории должна обеспечивать освещение рабочих мест исследователей естественным светом.

Размещение средств отображения информации должно обеспечивать свободное восприятие общей сигнальной информации в интерьере лаборатории.

Геометрические размеры зоны досягаемости моторного поля на рабочих местах в лаборатории определяются требованиями ГОСТ 12.2.032–78 (для положения сидя) и ГОСТ 12.2.033–78 (для положения стоя).

Геометрические размеры оптимальной зоны информационного поля для размещения общих средств отображения информации в лаборатории должны быть: площадь зоны – 4,5 м<sup>2</sup>; высота верхней границы зоны от пола – 2,5 м; ширина зоны – 3,0 м; высота нижней границы зоны от пола – 1,0 м.

## 14 Действия на случай возникновения загорания, пожара

Каждый обнаруживший пожар или загорание обязан:

- немедленно обесточить помещение;
- немедленно сообщить о пожаре по телефону 101;
- немедленно сообщить о пожаре администрации;
- приступить к тушению очага пожара имеющимися на рабочем месте средствами пожаротушения (огнетушитель, песок, и т. д.);
- при тушении электроустановок огнетушителями не подходить ближе одного метра до очага горения;
- при применении углекислотных огнетушителей не братья голый рукой за раструб;
- тушение вертикальных конструкций производить сверху вниз.

Студент, находящийся в лаборатории, при получении сообщения об эвакуации обязан:

- немедленно прекратить занятие;
- быстро и без паники в сопровождении преподавателя, проводящего занятие, покинуть здание в безопасное место, пройти переключку у данного преподавателя и ждать последующих указаний;
- сохранять выдержку и хладнокровие, не допускать паники.

Студент, оставшийся во время пожара в лаборатории, обязан:

- прежде чем открыть дверь лаборатории, потрогать ее руками. Если она нагрелась, не открывать ее, иначе огонь проникнет в помещение;
- при возможности покинуть помещение через окно; оказавшись на верхнем этаже, заткнуть щели подручными средствами, чтобы дым не проникнул в помещение лаборатории;
- сообщить о своем местонахождении (по телефону или привлекая внимание с помощью рук и криков о помощи).

## 15 Действия на случай других аварийных ситуаций

При возникновении в рабочей зоне проведения лабораторной работы опасных условий труда (появление запаха гари и дыма, повышенное тепловыделение от оборудования, повышенный уровень шума при его работе, неисправность заземления, загорание материалов и оборудования, прекращение подачи электроэнергии, появление запаха газа и т. п.) необходимо немедленно прекратить работу, выключить оборудование, сообщить о происшествии преподавателю.

При несчастном случае необходимо быстро принять меры по предотвращению воздействия травмирующих факторов на потерпевшего, оказанию первой помощи пострадавшему, вызову на место происшествия медицинских работников или доставке потерпевшего в организацию здравоохранения. Сообщить о происшествии ответственному лицу за безопасное производство работ, обеспечить до начала расследования

сохранность обстановки, если это не представляет опасности для жизни и здоровья людей.

При поражении электрическим током необходимо освободить пострадавшего от действия тока (выключить рубильник, перерубить провод, оттянуть или отбросить его сухой палкой, шестом). Не прикасаться к пострадавшему, пока он находится под действием тока. Доврачебную помощь оказывать сразу после прекращения воздействия электрического тока. Если пострадавший находится в бессознательном состоянии, то немедленно приступить к массажу сердца и искусственному дыханию до прибытия врача. Одновременно с этим применяется нашатырный спирт, растирание и согревание.

### **Список литературы**

1 **Куликов, В. П.** Технология сварки плавлением и термической резки: учебное пособие / В. П. Куликов. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 388 с.: ил.