

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Оборудование и технология сварочного производства»

ТЕОРИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности*

*1-36 01 06 «Оборудование и технология сварочного производства»
очной и заочной форм обучения*

Часть 1



Могилев 2023

УДК 621.9.07
ББК 30.606
Т33

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Оборудование и технология сварочного производства» «03» февраля 2023 г., протокол № 9

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

Рецензент Е. В. Ильюшина

Методические рекомендации к лабораторным работам по дисциплине «Теория сварочных процессов» предназначены для студентов специальности 1-36 01 06 «Оборудование и технология сварочного производства».

Учебное издание

ТЕОРИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

Часть 1

Ответственный за выпуск	А. О. Коротеев
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Е. В. Ковалевская

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 32 экз. Заказ №

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, 2023

Содержание

1 Лабораторная работа № 1. Исследование тепловых процессов при сварке пластин.....	4
2 Лабораторная работа № 2. Исследование проплавления изделий при дуговой сварке плавящимся электродом.....	12
3 Лабораторная работа № 3. Исследование структуры ЗТВ и металла сварных соединений из малоуглеродистой стали.....	22
4 Лабораторная работа № 4. Исследование структуры сварных соединений из чугуна.....	31
5 Лабораторная работа № 5. Исследование структуры сварных соединений из цветных металлов.....	37
6 Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ.....	43
7 Действия на случай возникновения загорания, пожара.....	44
8 Действия на случай других аварийных ситуаций.....	45
Список литературы.....	45

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

Температура характеризует степень нагретости тела и представляет собой одну из важнейших тепловых величин. Температурное поле – распределение температур в конкретный момент времени; оно может выражаться как в абсолютной температуре T , так и в приращении температур ΔT по отношению к начальной температуре тела T_n . В общем случае температурное поле может быть функцией не только координат (x, y, z) , но и времени t .

Для наглядности температурные поля часто представляют в виде изотерм. Изотермической поверхностью или изотермической линией называется геометрическое место точек тела, имеющих одинаковую температуру. От точки к точке температура тела может меняться. Изменение температуры в каком-либо направлении на длине бесконечно малого отрезка называется градиентом температур в рассматриваемой точке по данному направлению. Градиент температуры в точке максимален в направлении нормали к изотерме.

Тепловое состояние металла, шлака и других компонентов, взаимодействующих в процессе образования сварного соединения, в значительной мере обуславливает характер, направление и скорость протекания всех физико-химических и металлургических процессов. Особенности распределения температуры, скоростями отвода теплоты и охлаждения при сварке определяет структура металла шва и различных участков основного металла, прилегающего к шву. Таким образом, без учета теплового состояния металла нельзя достаточно глубоко объяснить большинство явлений, наблюдаемых при сварке.

Процессы распространения теплоты при различных видах сварки чрезвычайно сложны и в основном без некоторых допущений и упрощений расчетным определениям не поддаются. В большинстве случаев, учитывая конкретно поставленные задачи расчета и условия сварки, удается перейти к более простым, идеальным теоретическим расчетным схемам.

Характер распространения теплоты в теле существенно зависит от формы и размеров последнего. Точный учет конфигурации тела может привести к таким усложнениям расчёта, что его практическое использование окажется затруднительным. Поэтому во всех случаях, когда пренебрежение второстепенными особенностями формы тела не приводит к большим погрешностям расчета, целесообразно упрощать формы рассматриваемых тел, сводя их к простейшим. Обычно выбирают одну из следующих схем.

Бесконечное тело – тело, имеющее значительную протяженность по всем координатным осям X, Y, Z , границы которого не влияют на характер теплового

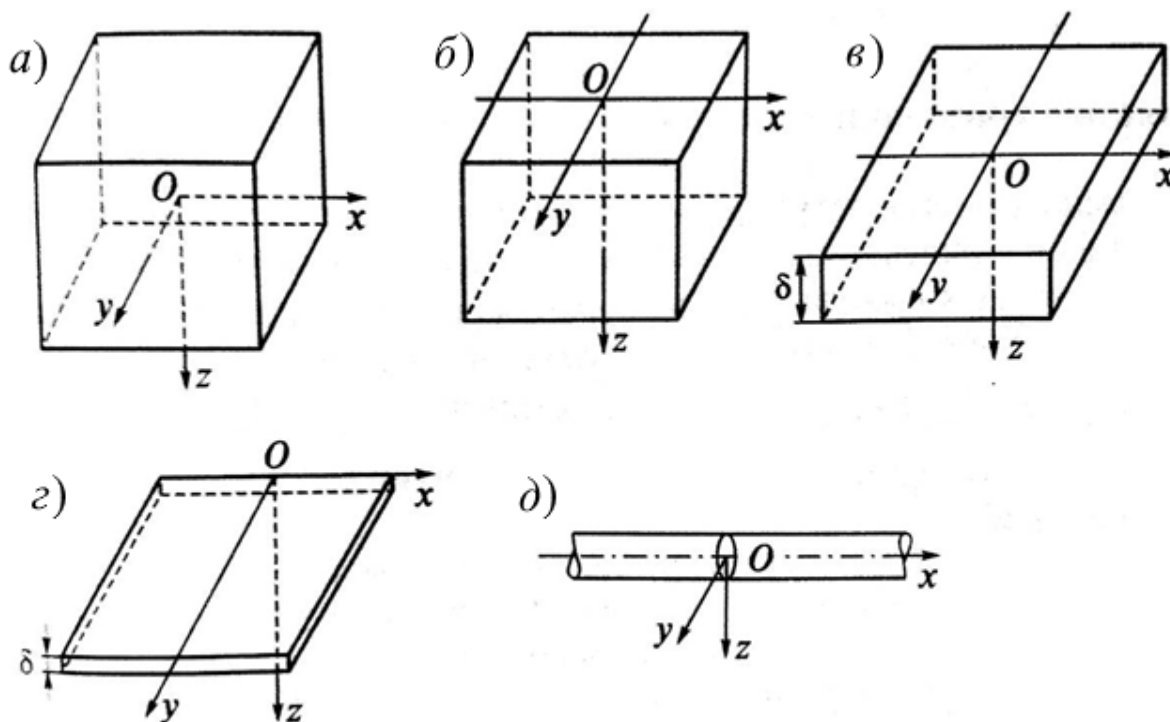
поля (рисунок 1.1, *а*). Тепловой поток в этом случае пространственный, причем источник теплоты находится внутри тела.

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 (рисунок 1.1, *б*). Тепловой поток в этом случае также пространственный.

Плоский слой – тело, ограниченное двумя параллельными плоскостями, в котором распределение температур по толщине не является равномерным (рисунок 1.1, *в*). Тепловой поток в этом случае пространственный. Данную схему применяют тогда, когда толщина изделия не настолько велика, чтобы можно было пренебречь влиянием ограничивающей плоскости $z = \delta$ и считать тело полубесконечным.

Бесконечная пластина – плоский слой, в котором температура по оси, перпендикулярной к плоскостям, постоянна и прогрев по толщине можно считать равномерным (рисунок 1.1, *г*). Распространение тепла происходит только в одной плоскости, т. е. по двум координатам.

Бесконечный стержень – тело с прямолинейной или криволинейной осью, размеры которого по оси настолько значительны, что концевые поверхности не влияют на распространение тепла. Температура в любой точке поперечного сечения постоянна. Тепловой поток в стержне линейный и распространяется вдоль оси.



а – бесконечное тело; *б* – полубесконечное тело; *в* – плоский слой; *г* – бесконечная пластина; *д* – бесконечный стержень

Рисунок 1.1 – Расчетные схемы тел

Помимо указанных схем, в практике расчётов используют также и другие простейшие схемы, например сплошной цилиндр, тонкостенный цилиндр. В приведенных схемах тел могут использоваться как декартовы, так и цилиндрические или полярные координаты.

Следует отметить, что приведенная схематизация в определенной степени условна и только четкое понимание физической модели процесса позволяет грамотно выбрать соответствующую расчетную схему. Например, одному и тому же свариваемому изделию могут соответствовать различные схемы теплопроводящих тел: бесконечное тело – при выполнении корневых швов в условиях многослойной сварки в узкий зазор при двусторонней разделке кромок; полубесконечное тело – при выполнении на поверхности последнего слоя сварного шва; плоский слой – при электронно-лучевой сварке с несквозным проплавлением, но со сквозным прогревом изделия; пластина – при электронно-лучевой сварке со сквозным проплавлением. Основным критерием при выборе расчетной схемы должен служить ожидаемый вид теплового потока – пространственный, плоский или линейный.

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.

Период теплонасыщения – первоначальный момент после зажигания дуги, когда количество вносимой теплоты превышает теплоотвод и область разогрева увеличивается.

Квазистационарное или предельное состояние – период непрерывного горения дуги, когда количество теплоты, вводимой в тело дугой, становится равным количеству отведенной теплоты.

Период выравнивания – момент прекращения действия источника теплоты и выравнивания температур по сечению тела.

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;

v – скорость сварки, см/с.

При небольшой скорости перемещения источника тепло распространяется впереди источника. Степень вытянутости температурного поля определяется не абсолютной величиной скорости, а сложным параметром. Поверхностные изотермы от точечного источника постоянной мощности – овалы замкнутые кривые, смещенные относительно источника в сторону, противоположную его перемещению. Изотермы низких температур, по сравнению с высокими, более вытянуты.

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

α – коэффициент поверхностной теплоотдачи, Вт/(см² · К);

δ – толщина пластины, см.

Следует отметить некоторые особенности в расчетах по схеме линейного источника постоянной мощности. Функция Бесселя предусматривает интенсивность теплоотода. Тепловое поле в пластине «стесненное» по сравнению с полем точечного источника в полубесконечном теле. С удалением от источника температура в пластине убывает медленнее, чем в полубесконечном теле.

Аргумент функции Бесселя зависит, наряду с другими факторами, от теплоотдачи пластины в окружающую среду, что, в свою очередь, определяется толщиной пластины. Распределение температур по отрицательной полуоси пластины, в отличие от распределения в полубесконечном теле, зависит от скорости сварки. Изотермы температурного поля по толщине пластины не меняются. Изотермические поверхности являются цилиндрами с осью, совпадающей с источниками тепла. С удалением от источника $T \rightarrow 0$ при $R \rightarrow \infty$, т. к. с увеличением аргумента $K_0(U)$ стремится к нулю.

Уравнение предельного состояния для процесса распространения тепла от точечного быстродвижущегося 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, $R = \sqrt{y^2 + x^2}$.

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

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

где a – коэффициент температуропроводности, см²/с;

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

Существенное влияние на температурное поле оказывают параметры режима сварки и теплофизические свойства свариваемых металлов.

В процессе однопроходной сварки источник теплоты перемещается в теле, вместе с ним перемещается температурное поле. Температура точек непрерывно изменяется. Изменение температуры во времени в данной точке тела называется термическим циклом.

1.2 Оборудование, приборы и материалы

1.2.1 Справочная литература.

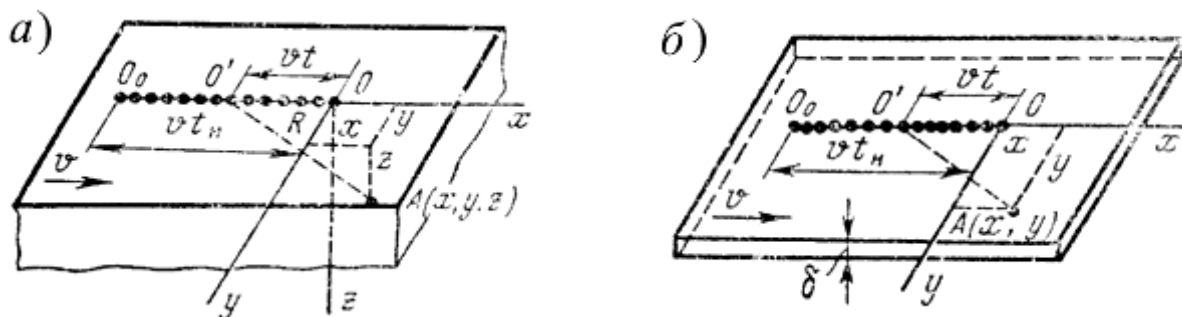
1.2.2 Калькулятор (ПЭВМ).

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.

Схемы нагрева для расчета представлены на рисунке 1.2.



a – полубесконечное тело (вариант 1); *б* – бесконечная пластина (вариант 2)

Рисунок 1.2 – Схемы нагрева согласно индивидуальному заданию

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 таблицы 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	0,3
2	230	23	0,25
3	220	22	0,2
4	210	22	0,15
5	200	22	0,1

Таблица 1.2 – Теплофизические величины для стали

Наименование	Обозначение	Единица измерения	Величина
Коэффициент теплопроводности	λ	$\frac{\text{Вт}}{\text{см} \cdot \text{К}}$	0,4
Коэффициент температуропроводности	a	$\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$	0,08
Коэффициент теплоотдачи	α	$\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{К}}$	$6 \cdot 10^{-3}$
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 следующие формулы:

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

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

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

Вариант 2

Расчитать распределение температур по оси OX (вдоль оси шва) и по оси OY (поперек оси шва) на различных расстояниях при сварке пластины в стык 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 $I_{св}$, А	Напряжение U , В	Скорость сварки V , см/с	Толщина пластины δ , 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 следующие формулы:

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

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

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

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

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

где $K_0(U)$ – функция Бесселя 2-го рода нулевого порядка от аргумента;
 δ – толщина пластины, см.

Пространственное расположение графиков в качестве примера представлено на рисунке 1.3.

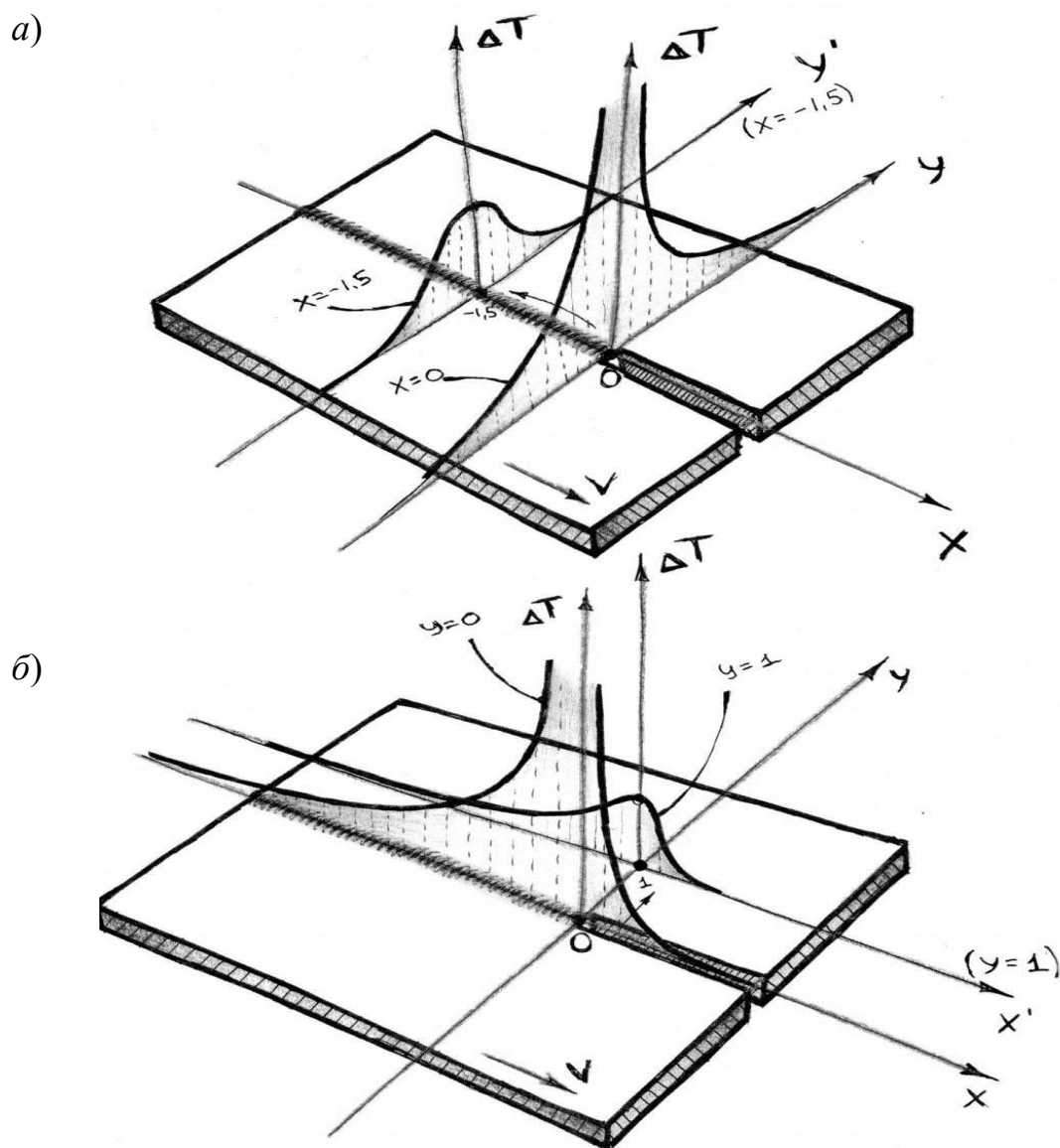


Рисунок 1.3 – Графики распределения приращения температуры ΔT по осям OX (a) и OY (б)

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 Как влияют теплофизические свойства металла на распределение теплоты при сварке?
- 4 Каким образом можно воздействовать на размеры зоны термического влияния?
- 5 Каким образом можно изменять скорость охлаждения металла?
- 6 Как выбрать схему нагреваемого тела и схему источника тепла в каждом конкретном случае?

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. С другой стороны тепло дуги расплавляет металл электрода или присадочный пруток.

Процессы проплавления основного и наплавки присадочного металла связаны между собой наиболее тесно при дуговой сварке плавящимся электродом. Распределение тепла дуги между её полюсами – электродом и изделием – зависит от материала полюсов, химического состава покрытия или флюса, рода и полярности сварочного тока и полярности дуги. Общую тепловую мощность сварочной дуги легко регулировать изменением величины тока, но возможность перераспределения тепла между изделием и электродом ограничена. Соотношения между количествами проплавленного основного и

наплавленного присадочного металла при заданных размерах и форме изделия и при заданном составе основного металла, электрода, покрытия, флюса устанавливают выбором условий режима: тока, напряжения на дуге, скорости и характера перемещения дуги по поверхности изделия, а также диаметром электрода или проволоки.

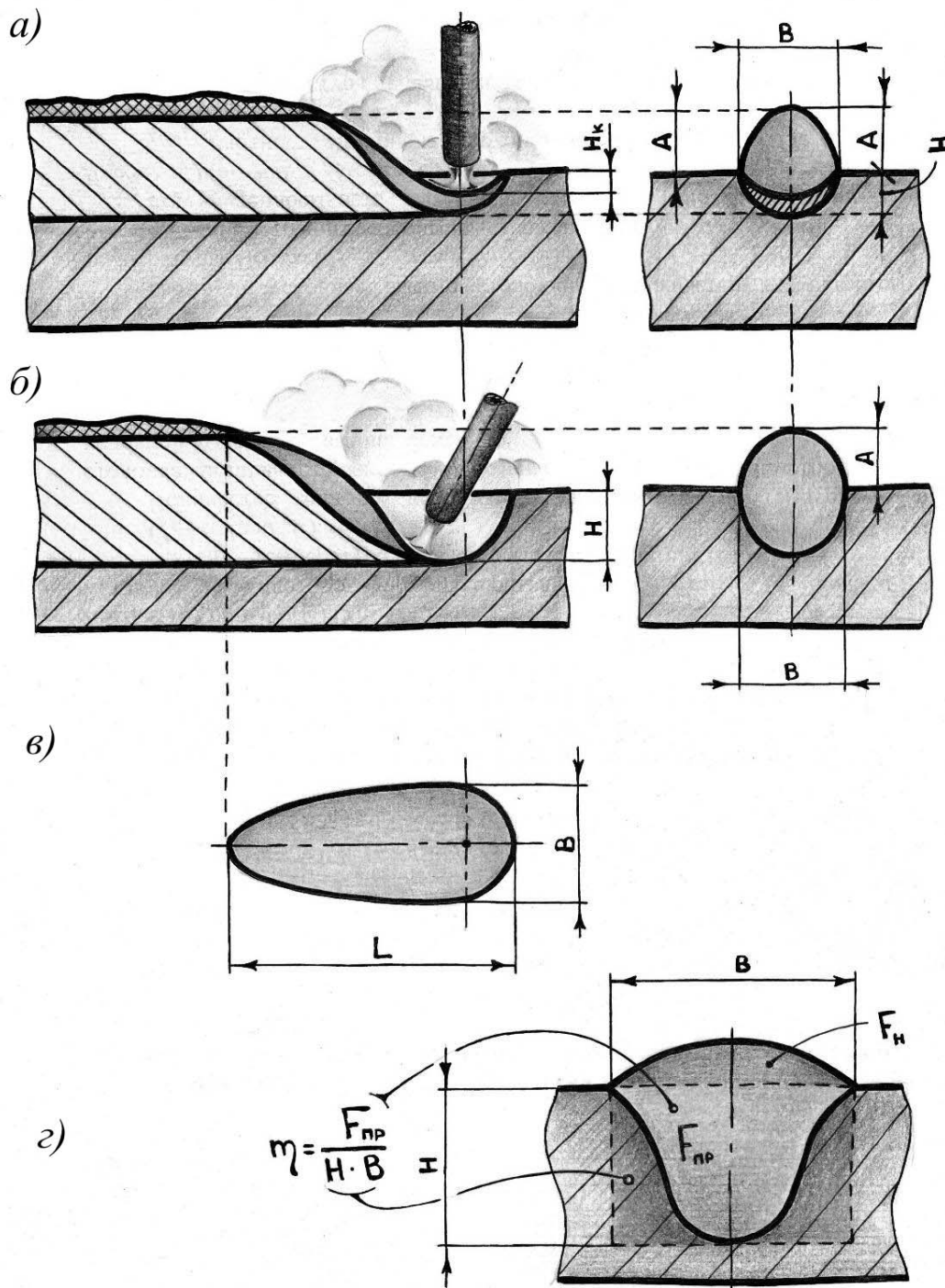
При сварке плавлением источник тепла – сварочная дуга должна проплавливать основной металл изделия на определенную глубину. Теоретически необходимая глубина проплавления основного металла, обеспечивающая получение прочного сварного соединения, может быть весьма незначительной. Практически среднюю глубину проплавления при дуговой сварке поддерживают в пределах не менее 1...1,5 мм, т. к. вследствие случайных отклонений режима дуги от стационарных условий при меньшей средней глубине проплавления возникнет опасность непровара. Слишком большой прогрев основного металла может привести к подрезам у краев шва и к сквозному проплавлению свариваемых кромок, связанному с вытеканием жидкого металла. Избыточная глубина проплавления может изменять свойства наплавленного металла вследствие увеличения доли основного металла в шве, а также увеличивается удельный расход электрической энергии.

Сварочная дуга вследствие высокой концентрации тепла в пятне нагрева мгновенно оплавляет поверхностный слой металла и перегревает его до температуры кипения. В процессе горения дуги слой расплавленного металла увеличивается и образует на поверхности основного металла сварочную ванну. Поток газа, быстро расширяющийся в дуговом промежутке вследствие высокой температуры дугового разряда, давит на поверхность ванны расплавленного металла и оттесняет жидкий металл из-под основания дуги. При этом дуга углубляется в образующийся под её основанием кратер. Помимо заданных перемещений вдоль и поперек шва (вследствие колебательных движений электрода), сварочная дуга способна погружаться в глубь ванны. Способность дуги углубляться в ванну зависит не только от дутья дуги, но и от многих других условий, в том числе от состава дуговой атмосферы, состава металла и шлаков, размеров ванны, положения шва и др. На практике наблюдаются весьма разнообразные типы погружения дуги. В дальнейшем рассмотрим следующие крайние типы – поверхностную дугу и погруженную дугу.

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. Ванна расплавленного металла – это область, нагретая в данный момент времени выше температуры плавления. Сварочная ванна ограничена мгновенной изотермической поверхностью температуры плавления. Зона проплавления представляет след перемещения ванны. При погруженной дуге жидкая ванна оттесняется к застывающему концу; пятно и столб дуги полностью или частично погружаются в кратер и более эффективно оплавляют дно ванны и её переднюю кромку. Под дугой остаётся лишь весьма тонкий слой жидкого металла. Такая погруженная дуга наблюдается обычно при сварке на

больших силах тока. Образующийся на конце электрода козырек из тугоплавкого покрытия может способствовать погружению дуги.

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; *з* – коэффициент полноты проплавления

Рисунок 2.1 – Геометрические параметры наплавленного валика

L – длина ванны; B – её ширина; 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 $m = F_{np}/HB$.

Сварка под флюсом характеризуется значительной глубиной проплавления. Ручная сварка отличается большим разбросом значений H/B , т. к. очертание зоны проплавления в этом случае зависит как от технологических свойств электрода, так и от его поперечных колебаний.

Коэффициент полноты m обычно меньше единицы, т. к. очертание зоны проплавления вписывается в прямоугольник с основанием B и высотой H (см. рисунок 2.1). При ручной дуговой наплавке валиков стальными электродами разных типов без поперечных колебаний при токе 140...300 А коэффициент полноты очертания зоны проплавления обычно колеблется в узких пределах от 0,6 до 0,7. При наплавке валиков стальным электродом с поперечными колебаниями при силах тока 250...1100 А коэффициент полноты обычно не выходит из пределов 0,6...0,8. Таким образом, коэффициент полноты достаточно устойчив и его удобно использовать при расчетах.

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. Площадь зоны наплавки зависит от количества присадочного металла, которое электрод подает в сварочную ванну. Избыточный металл располагается вне первоначальной кромки основного металла и образует валик.

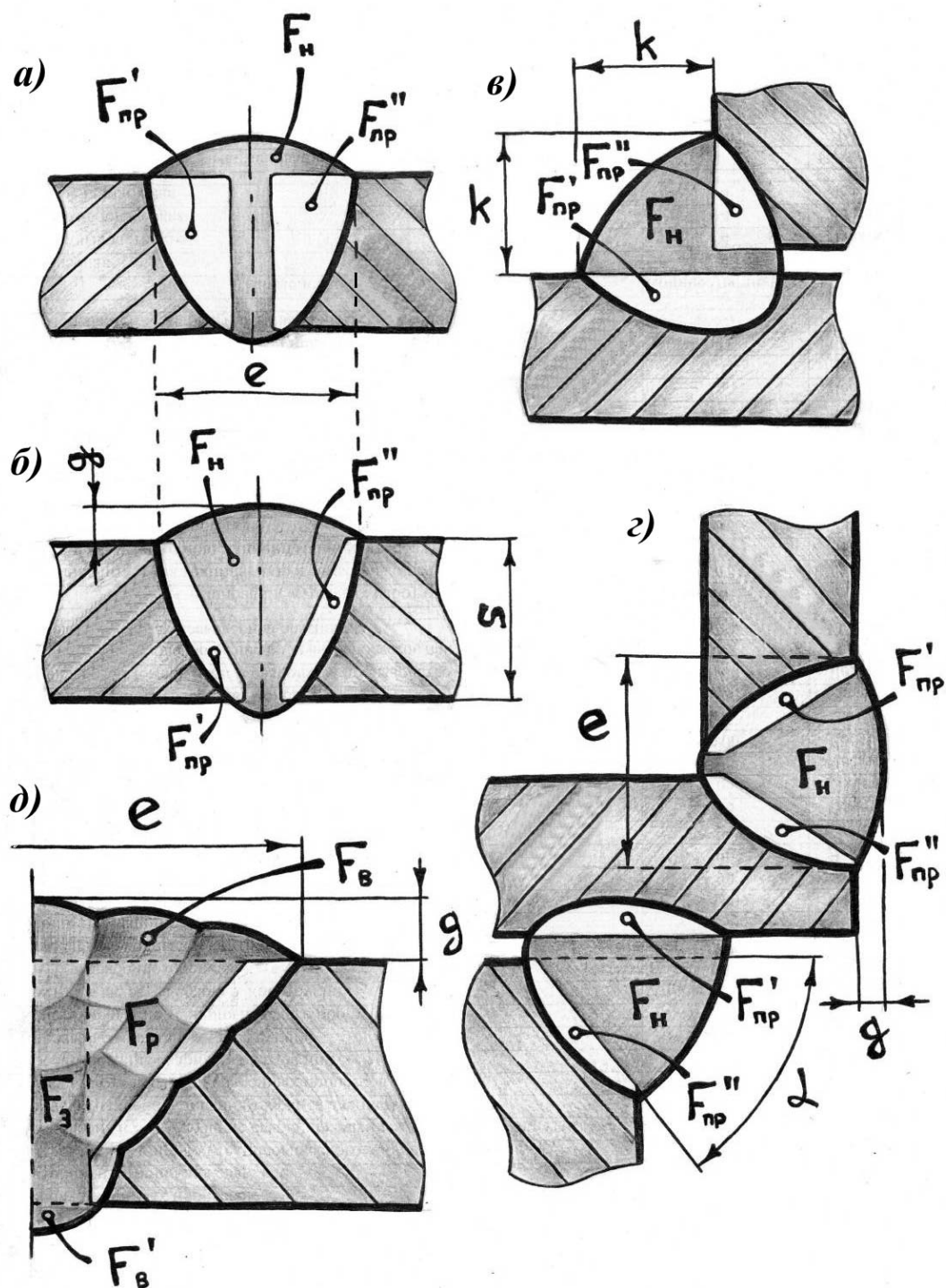
Отношение F_{np}/F_n называется коэффициентом площадей.

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). При сварке таких швов нужно выбирать режим, обеспечивающий максимальную величину F_n при минимальной F_{np} . Излишняя величина F_{np} не дает повышения прочности, а будет способствовать увеличению остаточных напряжений и вызовет нецелесообразный расход тепла на ненужное переплавление основного металла;

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 при минимальной площади наплавки, т. е. удовлетворять противоположным требованиям по сравнению со швами типа А.



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)

Рисунок 2.2 – Типы сварных швов

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 α_n , умеренных величинах тока и умеренных скоростях сварки. Повышение производительности достигается в основном за счет увеличения α_n (высокопроизводительные покрытия).

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

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 η_t для данного режима.

Н. Н. Рыкалиным разработана достаточно простая методика расчетного определения η_t для заданного режима по графикам.

Размеры сварочной ванны и зоны проплавления рассчитываются исходя из предположения, что тепло сосредоточенного источника тепла (сварочной дуги) распространяется по металлу вследствие теплопроводности и прогревает прилегающую к источнику зону металла выше температуры его плавления.

Теория процессов распространения тепла при дуговой сварке позволяет установить количественную зависимость размеров и очертания зон, прогреваемых выше заданной температуры, от условий режима сварки, т. е. тепловой мощности сварочной дуги и скорости её перемещения, а также от распределения тепла по поверхности изделия и от теплофизических свойств основного металла. Теоретические очертания ванны расплавленного металла должны соответствовать мгновенному очертанию изотермы температуры плавления. Оно несколько не совпадает с действительным, т. к. в этом случае в формуле не учтены некоторые теплофизические параметры.

При выводе уравнений, описывающих процессы распространения тепла сварочной дуги, предполагалось, что тепло дуги сосредоточено в точке или по линии, тогда как в действительности тепло дуги неравномерно распределено по поверхности пятна, углубленного в кратер. Расчетные схемы учитывают только распространение тепла вследствие теплопроводности, тогда как в действительности в ванне расплавленного металла тепло переносится конвективными потоками жидкого металла, вызванными дутьем дуги и неравномерностью распределения температуры в ванне.

Расчет не учитывает также скрытой теплоты плавления, поглощаемой на передней границе ванны и выделяемой на задней границе. Наконец, расчет по средним значениям параметров режима не принимает во внимание случайных отклонений этих параметров от расчетного, остающегося в среднем постоянным за время горения дуги. Эти отклонения могут существенно исказить размеры и очертания ванны и зоны проплавления.

Действительное очертание свариваемого изделия также не всегда совпадает с принятыми расчетными схемами (полубесконечным телом, пластиной, плоским слоем). Так, например, в листах, ограниченных по толщине, действительный теплоотвод будет меньше расчетного теплоотвода в неограниченном теле, а у края изделия меньше, чем в середине.

Отступления при расчете от действительных условий сварки и приводят к тому, что очертания ванны и зоны проплавления не соответствуют очертанию зоны изотермы, теоретически рассчитанному по схеме сосредоточенного источника тепла в твердом теле. На больших расстояниях от дуги вследствие выравнивающего влияния теплопроводности поперечные колебания дуги и её погружение вглубь ванны мало сказывается на очертаниях изотерм. При расчете размеров сварочной ванны и зоны проплавления необходимо считаться с этими особенностями процесса.

2.2 Оборудование, приборы и материалы

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

2.2.2 Секундомер.

2.2.3 Штангенциркуль.

2.2.4 Линейка стальная.

2.2.5 Фрезерный станок.

2.2.6 Образцы стальные.

2.2.7 Реактивы для травления микрошлифов.

2.2.8 Клейма стальные (цифровые).

2.2.9 Калька и миллиметровка.

2.3 Порядок проведения работы

Данные для расчета взять из таблицы 2.1.

Таблица 2.1 – Исходные данные

Номер валика	$I_{св}$, А	U_0 , В	$v_{св}$, см/с
1	400	34	0,69
2	650	36	
3	800	38	

2.3.1 Рассчитать численное значение η_t (теоретический КПД проплавления) для заданных режимов. Для расчета пользоваться графическим методом Н. Н. Рыкалина. На основном расчетном графике дана зависимость искомой величины η_t от ε_3 – безразмерного критерия режима – для различной относительной глубины проплавления h/b .

Последовательность расчета:

1) вычисляется критерий режима

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

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

$v_{св}$ – скорость сварки, см/с;

a – коэффициент температуропроводности, $a = 8 \cdot 10^{-2}$ см²/с;

$S_{нл}$ – теплосодержание расплавленного металла, $S_{нл} = 10500$ Дж/см³;

2) по графику (рисунок 2.3) находим η_t , соответствующий вычисленному значению ε_3 (используется кривая $h/b = 0,5$), т. к. производится наплавка узкого валика.

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

Площадь проплавления F_{np} определяется из выражения

$$F_{np} = \frac{\eta_t \cdot q}{S_{нл} \cdot v_{св}}.$$

Площадь наплавки F_n вычисляется по формуле

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

где α_n – коэффициент наплавки; для механизированной сварки в CO₂ $\alpha_n = 12 \dots 14$ г/(А·ч);

$v_{св}$ – скорость сварки, см/с;

ψ – коэффициент потерь; для сварки в CO₂ $\psi = 0,12$ (12 %);

γ – плотность стали, $\gamma = 7,8$ г/см³.

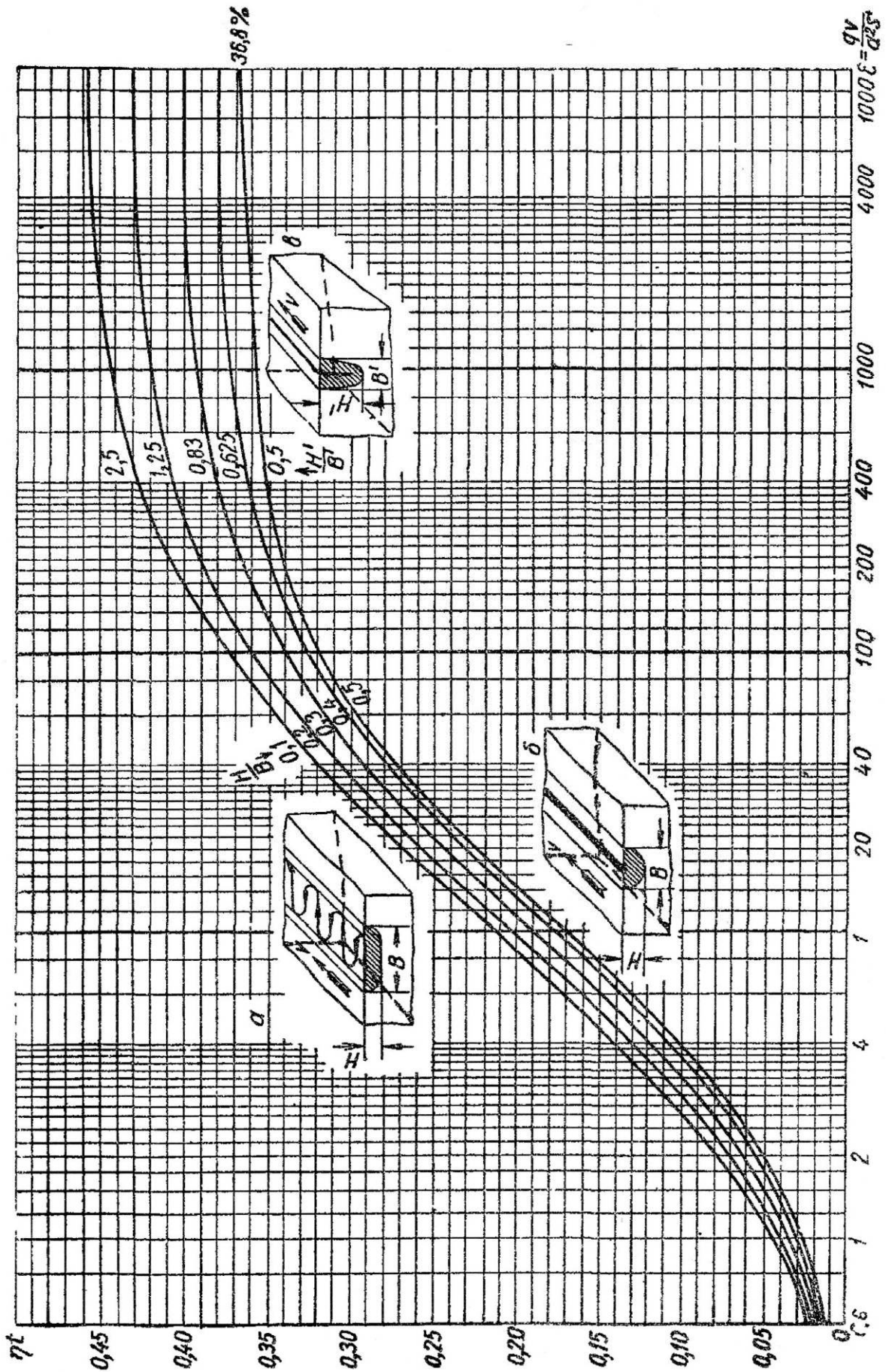


Рисунок 2.3 – График для расчетного определения термического КПД при наплавке валика на массивное тело

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

2.3.3 Произвести наплавку валиков на пластины.

2.3.3.1 Собрать сварочный пост с включением измерительных приборов.

2.3.3.2 Установить требуемый сварочный ток путем сварки на пластине.

На рабочем образце нанести мелом штрихи через 1 см для облегчения выдерживания требуемой скорости и рассчитать время сварки 1 см (для обеспечения стабильности скорости сварки допускается выполнять сварку в автоматическом режиме).

2.3.3.3 Произвести наплавку валика (без поперечных колебаний электрода или проволоки). В ходе наплавки следить за стабильностью параметров режима.

Если наплавка осуществляется в ручном режиме, зафиксировать фактическую скорость (время сварки 1 см) по секундомеру.

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

2.3.3.5 Отшлифовать плоскость разреза на камне и наждачной бумаге.

2.3.3.6 Протравить шлиф и высушить.

2.3.3.7 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.

2.3.4 По полученному экспериментально F_{np} определить η_t :

$$\eta_t = \frac{v_{св} \cdot F_{np} \cdot S_{пл}}{q},$$

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

F_{np} – площадь проплавления по замеру шлифа, м²;

q – эффективная мощность дуги по данным опыта, Вт.

2.3.5 Рассчитать коэффициент площадей по экспериментальным данным.

2.3.6 Результаты расчетов и экспериментов оформить в виде графиков.

В случае заметного расхождения расчетных и экспериментальных кривых письменно высказать ваши соображения о причинах расхождения.

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 η_t , F_{np} , F_n (приводится полностью).

2.4.5 Расчетная обработка экспериментальных данных.

2.4.6 Графики.

2.4.7 Выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Баланс различных дуговых источников тепла при сварке под флюсом, ручной сварке качественным и меловым электродами, угольной дугой и т. п.
- 2 Как влияют параметры режима сварки на величину термического КПД?
- 3 Каковы пути повышения термического, эффективного КПД при сварке?
- 4 Почему изменяются размеры шва при изменении скорости сварки?
- 5 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 ЗТВ при сварке углеродистых сталей и изучить закономерности ее образования.

3.1 Общие теоретические сведения

Стали – самый широко применяемый материал в различных сварных конструкциях – строительных металлоконструкциях, технологических аппаратах и трубопроводах химической, нефтяной, нефтеперерабатывающей промышленности, магистральных трубопроводах, автостроении, сельхозмашиностроении и др.

Среди многих элементов, которые могут входить в состав стали, наибольшее влияние на свойства оказывает углерод, поэтому сталь рассматривается прежде всего как сплав железа с углеродом.

По содержанию углерода и по структуре стали подразделяются на:

- доэвтектоидные ($0,02 \% < C < 0,8 \%$), со структурой феррит + перлит ($\Phi + \Pi$) (рисунок 3.1, а);
- эвтектоидные ($C = 0,8 \%$), со структурой перлита (Π). Перлит может быть пластинчатый или зернистый (рисунок 3.1, в);
- заэвтектоидные ($0,8 \% < C < 2,14 \%$), со структурой перлит + цементит вторичный ($\Pi + \text{Ц}_2$). Цементитная сетка, как правило, в этом случае располагается вокруг зерен перлита.

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

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

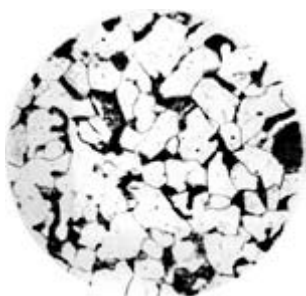
Перлит – механическая смесь феррита и цементита.

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.

Под 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).

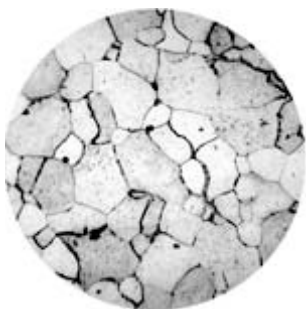
В процессе охлаждения первичная аустенитная структура (образованная после кристаллизации) претерпевает полиморфное превращение, в результате которого образуется вторичная ферритно-перлитная структура.

а)



Марка	Сталь 20
Травитель	3-процентный р-р азотной кислоты в спирте
Обработка	Отжиг
Структурные составляющие	Феррит , перлит
Описание	Избыточный феррит (светлые зерна, матрица) и перлит (включения). Пример удовлетворительного травления. Границы зерен феррита отлично различаются и, несмотря на низкое разрешение фото, с трудом, но различается субструктура перлита

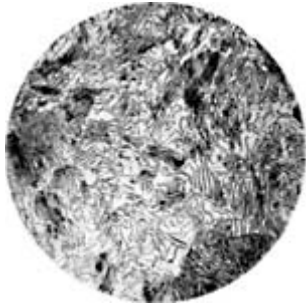
б)



Марка	Сталь 10
Травитель	3-процентный р-р азотной кислоты в спирте
Обработка	Медленное охлаждение
Структурные составляющие	Феррит, цементит третичный
Описание	Нежелательная структура. Зерна феррита (матрица) и отдельные включения третичного цементита в виде тонких прослоек по границам зерен. Избирательная травимость (разный оттенок различных зерен) связана с разной ориентировкой их решеток относительно плоскости шлифа. Темные пятна – дефекты полировки («грязь»)

Рисунок 3.1 – Типичные структуры углеродистых сталей

в)

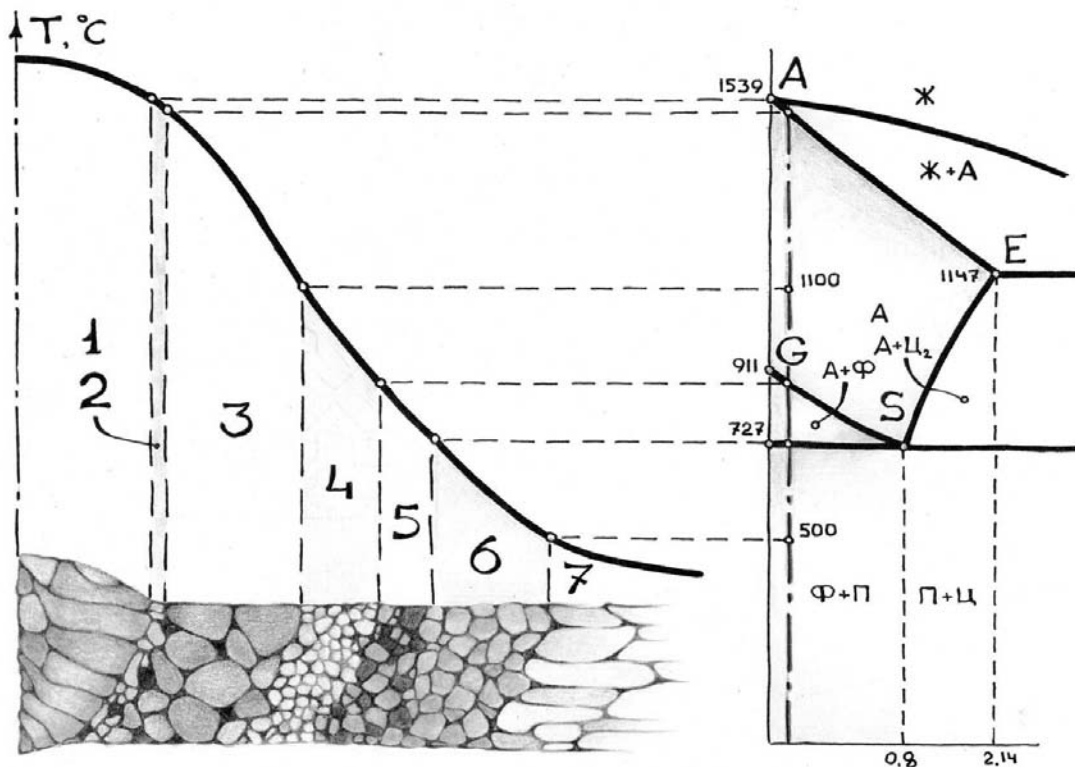


Марка	Сталь 80
Травитель	3-процентный р-р азотной кислоты в спирте
Обработка	Отжиг
Структурные составляющие	Перлит
Описание	Колонии крупнопластинчатого перлита в зернах с хорошо различимой пластинчатой структурой. Крупные пластины ухудшают механические свойства

Окончание рисунка 3.1

Рассмотрим структурные изменения от нагрева сваркой. Часть основного металла, расположенная близко к сварному шву или валику, в процессе сварки подвергается нагреву до некоторой температуры, т. е. наряду со сваркой происходит процесс термической обработки. Температура нагрева отдельных точек металла в этой зоне будет различной в зависимости от расстояния до рассматриваемой точки от границы между основным и наплавленным металлом.

На рисунке 3.2 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 3.2 – Структура зоны термического влияния сварного соединения

Как видно из этой кривой, при переходе от наплавленного металла к основному вначале наблюдается наиболее резкое падение температуры, которое затем при переходе к более удаленным зонам становится более плавным.

При определении структуры зоны термического влияния необходимо исходить из максимальной температуры, до которой был нагрет в процессе сварки тот или иной участок рассматриваемой зоны, а также из скорости его последующего охлаждения. При прочих равных условиях скорость охлаждения в конечном счете также определяется максимальной температурой нагрева.

Температура нагрева при сварке отдельных участков зоны влияния весьма различна, начиная от комнатной и кончая температурой плавления данного металла или сплава. Поэтому структура металла в этой зоне будет довольно пестрой, переходя от неизменной структуры основного металла до литой структуры наплавленного металла. Характер структур в отдельных участках этой зоны может быть определен из рассмотрения диаграммы состояния сплава, подвергаемого сварке.

Структурное состояние свариваемого металла при различных температурах нагрева показано в диаграмме состояния сплава Fe–C вертикальной линией. Несмотря на то, что в зависимости от температуры нагрева структура металла в зоне влияния непрерывно меняется от точки к точке, все же внутри этой зоны можно выделить отдельные участки с одинаковой или сходной структурой. Намечая по диаграмме состояния температурные границы этих участков зоны влияния, имеющих одинаковую микроструктуру, а следовательно, и свойства, перенесем эти границы на кривую распределения температур при сварке, а от нее проектируем вертикалями – на изображенный внизу сварной шов. Это дает возможность определить уже не температурные, а линейные границы отдельных участков зоны термического влияния.

В зависимости от температуры нагрева при сварке малоуглеродистых стальных изделий можно различать в зоне термического влияния 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 полосу основного металла, нагреваемую при сварке до температур начала и конца плавления.

При максимальной температуре нагрева этот участок состоит из смеси твердой и жидкой фаз, что способствует развитию резко выраженной крупнозернистости.

При сварке низкоуглеродистой стали температурный интервал неполного расплавления крайне незначителен. Если вспомнить, что здесь наблюдается также наиболее резкий градиент температур, то станет понятным, что линейные размеры этого участка крайне малы. В структуре малоуглеродистой стали данный участок практически неразличим, сливаясь с наплавленным металлом. Однако значение этого участка для качества сварного соединения очень велико. Он является участком перехода от наплавленного металла к основному – участком, где произошло сваривание основного и наплавленного металлов. Особенности данного участка во многом определяют собой качество сварного соединения.

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, хотя на прочности отражается мало. Это подтверждается исследованием механической прочности образцов низкоуглеродистой стали, нагретых до разных температур (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Ударная вязкость металла в зависимости от температуры нагрева и способа охлаждения

Ударная вязкость нагретых и охлажденных образцов, Дж/см ²			Примечание
Температура нагрева, °С	Образцы охлаждались		
	на воздухе	в воде	
870	163	115	Образцы, нагретые до 1300 °С и охлажденные на воздухе, имели структуру перегрева
1000	134	86	
1200	125	82	
1300	95	79	

Нагрев до указанных температур рассматриваемой переходной зоны тем опаснее, чем больше способность стали к закалке. Следует отметить, что чем выше содержание в стали углерода, тем больше ухудшаются механические свойства стали и тем труднее восстановить их последующей термической обработкой.

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. Если после перекристаллизации металл долго выдерживается при температурах выше точки A_{C3} или нагревается до более высоких температур, что наблюдается в участке перегрева, то снова заметен рост зерен, уничтожающий благоприятное влияние перекристаллизации. Однако длительность выдержки при максимальной температуре в процессе сварки очень невелика, поэтому металл этого участка после охлаждения имеет благоприятную равноосную мелкозернистую структуру и высокие механические свойства. Механические свойства металла данного участка обычно выше свойств основного металла, не затронутого действием тепла при сварке.

Точка A_{C3} для низкоуглеродистой стали соответствует температурам порядка 900 °С. Верхним пределом зоны нормализации можно считать в этом случае температуру 1000 °С...1100 °С. Благодаря скорости нагрева при сварке только при температурах порядка 1100 °С основной металл показывает заметные следы перегрева. При сварке под слоем флюса верхняя граница этого интервала ещё выше.

Участок неполной перекристаллизации включает металл, получивший максимальную температуру нагрева при сварке в пределах от точки A_{C1} до точки A_{C3} . Для малоуглеродистой стали температурный интервал этого участка лежит примерно в пределах от 725 °С до 900 °С. Металл данного участка подвергается в процессе нагрева и охлаждения только частичной перекристаллизации, отсюда и название участка, отражающее сущность протекающих в нем процессов.

Процесс перекристаллизации доэвтектоидной стали протекает следующим путем. До нагрева основной металл имеет структуру, состоящую из смеси феррита и перлита со значительным преобладанием феррита. При достижении в процессе нагрева температуры $725\text{ }^{\circ}\text{C}$ в стали наблюдается эвтектоидное превращение, и перлит превращается в аустенит. Согласно правилу фаз это превращение протекает при постоянной температуре ($725\text{ }^{\circ}\text{C}$ – точка A_{C1}).

Образовавшийся в результате эвтектоидного превращения твердый раствор (аустенит) имеет концентрацию углерода примерно 0,83. Будучи окружен значительными массами феррита, т. е. практически чистого α -железа, аустенит стремится растворить его. Это растворение феррита в аустените происходит при повышении температуры выше $725\text{ }^{\circ}\text{C}$, причем каждой температуре соответствует строго определенное количество феррита, перешедшего в твердый раствор. В связи с этим концентрация углерода в аустените, равная 0,83 % при $725\text{ }^{\circ}\text{C}$, с повышением температуры понижается в полном соответствии с линией GS диаграммы состояния сплава железа с углеродом. Растворение феррита в аустените заканчивается в точке A_{C1} . При этой температуре и выше сталь состоит только из зерен аустенита, концентрация углерода в котором равна среднему содержанию углерода в данной стали.

При охлаждении процесс протекает в обратном направлении. Начиная с температуры точки A_{r3} , из аустенита выделяется феррит, и в связи с этим концентрация углерода в остающемся аустените повышается. К моменту точки A_{r1} ($725\text{ }^{\circ}\text{C}$ или ниже – в зависимости от скорости охлаждения) выделяется весь избыточный феррит, а концентрация углерода в аустените достигнет эвтектоидной. При этой температуре произойдет эвтектоидное превращение, и аустенит превратится в перлит.

В пределах одного и того же зерна аустенита может существовать несколько центров, вокруг которых формируется выделяемый феррит и, следовательно, из одного зерна аустенита при охлаждении может образоваться несколько новых зерен феррита. В этом и заключается благоприятное влияние процесса перекристаллизации, благодаря которому крупнозернистой стали можно придать мелкозернистое строение и тем самым значительно повысить её механические свойства.

В рассматриваемом участке металл нагревается до температуры, лежащей между точками A_{C1} и A_{C3} и, следовательно, при максимальной температуре нагрева только часть феррита будет растворена в аустените. Другая часть его, величина которой зависит от температуры нагрева, останется структурно свободной, сохраняя очертания старых зерен. При охлаждении растворенный феррит будет выделен из аустенита и образует ряд новых, более мелких зерен феррита. Закончится перекристаллизация, как обычно, превращением аустенита в перлит.

Структура прошедшей такую частичную перекристаллизацию стали будет весьма своеобразная, сохраняя наряду со старыми более крупными зернами феррита, не проходившими перекристаллизации, новые значительно более мелкие зерна феррита и перлита, прошедшие перекристаллизацию. Мелкие

зерна феррита и перлита располагаются обычно в виде «колоний» по границам крупных, не прошедших перекристаллизации зерен феррита.

Благодаря довольно резкому различию в размерах зерен механические свойства металла, подвергнутого частичной перекристаллизации, относительно невысоки.

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

Участок рекристаллизации находится в границах температур нагрева от $450\text{ }^{\circ}\text{C}$... $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ до точки A_{C1} , т. е. до $725\text{ }^{\circ}\text{C}$. В этом интервале температур может протекать явление рекристаллизации зерен феррита. Сущность явления рекристаллизации состоит в росте (повторная кристаллизация) зерен феррита из обломков их, полученных действием предварительной пластической деформации.

Явление рекристаллизации в литом металле не имеет места, потому что зерна металла здесь разобщены тонкой пограничной пленкой межкристаллитного вещества и микроскопическими порами и пустотами. Межкристаллитное вещество, возможность существования которого экспериментально доказана, представляет сложную эвтектику из основного металла и примесей, которая располагается на границах зерен, окружая их подобно тому, как орех окружен скорлупой.

Кристаллические решетки соседних зерен, будучи совершенно одинаковыми, отличаются друг от друга только различным расположением осей в пространстве. 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. Если зерна окружены хотя бы очень тонкой оболочкой межкристаллитного вещества, переход атомов железа из одного кристаллита в другой будет невозможен, и роста зерен наблюдаться не будет.

При холодной механической обработке давлением или резанием наблюдается раздробление бывших прежде равноосными зерен металла и некоторый сдвиг и поворот образовавшихся обломков кристаллитов по плоскостям скольжения. Структура такого пластически деформированного металла состоит из неравноосных, вытянутых в одном направлении кристаллических обломков. Одновременно с раздроблением зерен основного металла наблюдается и раздробление оболочки межкристаллитного вещества, и обломки кристаллитов будут иметь между собой большое количество стыков, не разобщенных межкристаллитным веществом. Благодаря этому становится возможным рост зерна, если кинетическая энергия колебания атомов железа вокруг узлов пространственной решетки, определяемой температурой металла, будет достаточной для перекристаллизации атомов от одного кристалла к другому.

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 °С, т. к. при этой температуре начинается уже перекристаллизация металлической основы стали.

Для большей ясности подчеркнем, что при перекристаллизации наблюдается аллотропическое превращение железа (изменение строения кристаллической решетки), а при рекристаллизации аллотропического превращения не наблюдается. Строение кристаллической решетки остается тем же, рост зерен происходит только благодаря переходу атомов железа из одного кристаллита в другой. При этом кристаллиты, как сказано ранее, имеют пространственную решетку одной и той же системы, но различно ориентированную в пространстве.

Пластическая деформация металлов сопровождается значительным упрочнением, а именно 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.

В процессе этого отжига благодаря рекристаллизации из обломков зерен зарождаются и растут новые равноосные зерна феррита. Если выдержка при отжиге будет излишне продолжительной, эти зерна, оставаясь равноосными, могут достичь значительной величины, что снова приведет к некоторому ухудшению механических свойств металла.

Если свариваемые детали были предварительно подвергнуты холодной пластической деформации и имели структуру в виде сильно вытянутых в направлении деформации равноосных кристаллических обломков, что часто бывает при сварке металлических конструкций из низкоуглеродистых сталей, то в участках металла, температура нагрева которых при сварке лежит в пределах 500 °С ...725 °С, будет наблюдаться довольно интенсивный процесс рекристаллизации. Структура участка рекристаллизации будет в этом случае состоять из равноосных зерен феррита и перлита, полученных в результате рекристаллизации. Ближе к верхнему пределу рассматриваемого интервала температур возможна также сфероидизация цементита, входящего в состав перлита, благодаря чему у перлита наблюдается тенденция к переходу из пластинчатой формы в зернистую.

Следовательно, структура рекристаллизации будет сильно отличаться от структуры основного металла, если последний перед сваркой был подвергнут пластической деформации. Если же основной металл перед сваркой пластической деформации не подвергался, то явление рекристаллизации не будет иметь места, и участок рекристаллизации никаких структурных отличий от основного металла иметь не будет. В этом случае первое структурное отличие зоны термического влияния от основного металла будет наблюдаться только в участке неполной перекристаллизации.

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. Возможно, что явление синеломкости связано с подготовкой к рекристаллизации и её течением. Пониженная пластичность металла в этом участке зоны термического влияния может послужить причиной развития трещин при сварке, и поэтому с наличием данного явления следует считаться.

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.

3.2.6 Лупа и набор инструментов для оценки макроструктуры.

3.3 Порядок проведения работы

3.3.1 Сварить подготовленные образцы в виде пластин из низкоуглеродистой стали одним из способов сварки (например, механизированной сваркой в защитных газах), выбрав соответствующий тип сварного соединения, а также соблюдая температурный режим в случае многопроходного шва (давать промежуточным слоям остывать до температуры порядка 150 °С с целью избегания перегрева изделия).

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 (3...5-процентный раствор HNO_3 в этиловом спирте) и протравить два образца (один для исследования макроструктуры, второй для исследования микроструктуры сварного соединения).

3.3.5 Визуально оценить макроструктуру сварного соединения. Сделать соответствующие выводы.

3.3.6 На металлографическом микроскопе исследовать микроструктуру зоны термического влияния. По возможности обнаружить характерные для неё участки. Зарисовать увиденные структуры в отчете на площади круга

диаметром 30 мм. На рисунках указать присутствующие структурные составляющие и дать краткие пояснения.

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 под микроскопом 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 В чем заключаются особенности структуры различных участков ЗТВ при сварке плавлением горячекатаной малоуглеродистой стали?

6 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).

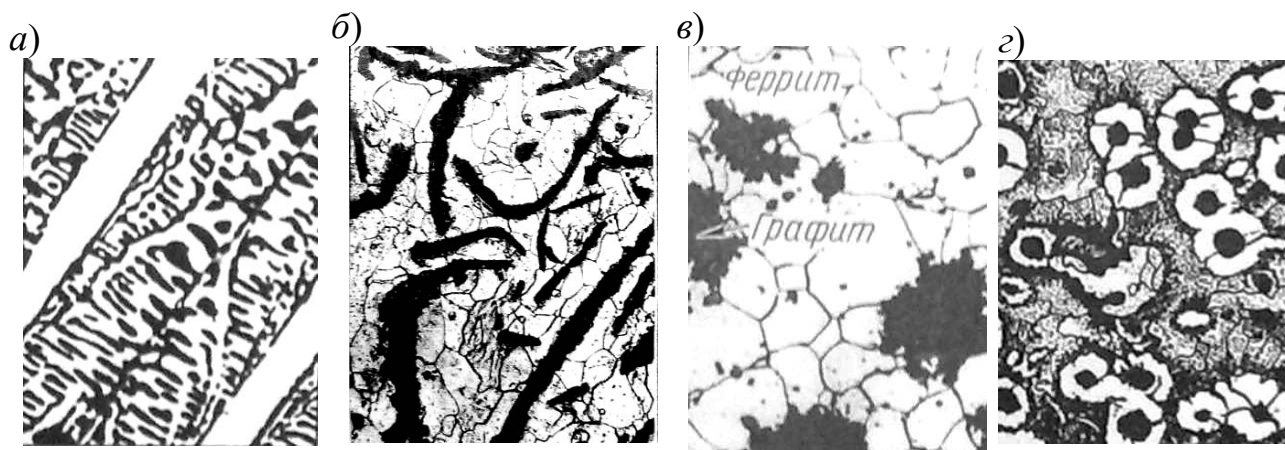


Рисунок 4.1 – Микроструктуры чугунов

Белые чугуны обладают очень высокой твердостью и режущим инструментом обрабатываться не могут, поэтому для изготовления изделий они применяются крайне редко, их используют главным образом в виде полупродукта для получения ковких 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. В связи с этим чугун относится к материалам, обладающим плохой свариваемостью. Тем не менее сварка чугуна имеет очень большое распространение как средство исправления брака чугунного литья, ремонта чугунных изделий, а иногда и при изготовлении конструкции.

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, т. е. появлению участков с выделениями цементита той или иной формы в различном количестве. Высокая твердость отбеленных участков практически лишает возможности обрабатывать чугуны режущим инструментом.

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. Наличие отбеленных участков создает дополнительные структурные напряжения, способствующие трещинообразованию.

Интенсивное газовыделение из сварочной ванны, которое продолжается и на стадии кристаллизации, может приводить к образованию пор в металле шва.

Повышенная жидкотекучесть чугуна затрудняет удержание расплавленного металла от вытекания и формирование шва.

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). Технологический процесс горячей сварки состоит из следующих этапов: I – подготовка изделия под сварку; II – предварительный подогрев деталей; III – сварка; IV – последующее замедленное охлаждение. Замедление охлаждения приводит к распаду аустенита с образованием ферритной или перлитно-ферритной металлической основы.

Горячая сварка чугуна позволяет получать сварные соединения, равноценные свариваемому металлу (по механическим характеристикам, плотности, обрабатываемости и др.), однако это трудоемкий и дорогостоящий процесс. Вместе с этим в ряде случаев к сварным соединениям из чугуна не предъявляется таких требований. Часто, например, достаточно обеспечить только равнопрочность или только хорошую обрабатываемость, или плотность сварных швов. С помощью различных металлургических и технологических средств можно получить сварные соединения из чугуна с теми или иными свойствами при сварке с невысоким подогревом или вовсе без предварительного подогрева (т. е. с помощью полугорячей или холодной сварки).

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). В этом случае в основном образуются карбиды данного элемента, не растворяющиеся в железе и имеющие форму мелкодисперсных нетвердых включений. 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 чугуна низкоуглеродистыми электродами общего назначения наиболее слабое место сварного соединения – околошовная зона у границы сплавления. Хрупкость этой зоны и наличие в ней трещин нередко приводят к

отслаиванию шва от основного металла. Для увеличения прочности сварного соединения применяют стальные шпильки, которые частично разгружают наиболее слабую часть сварного соединения – линию сплавления.

При сварке плавлением без предварительного подогрева применяют чугуны и стальные электроды, 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. Поэтому, попадая в зону неполного расплавления, прилегающую к шву, они уменьшают вероятность отбеливания.

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. Одной из наиболее действенных мер, способствующих предупреждению образования в околошовной зоне ледебурита и мартенсита, является применение предварительного подогрева чугуна перед сваркой.

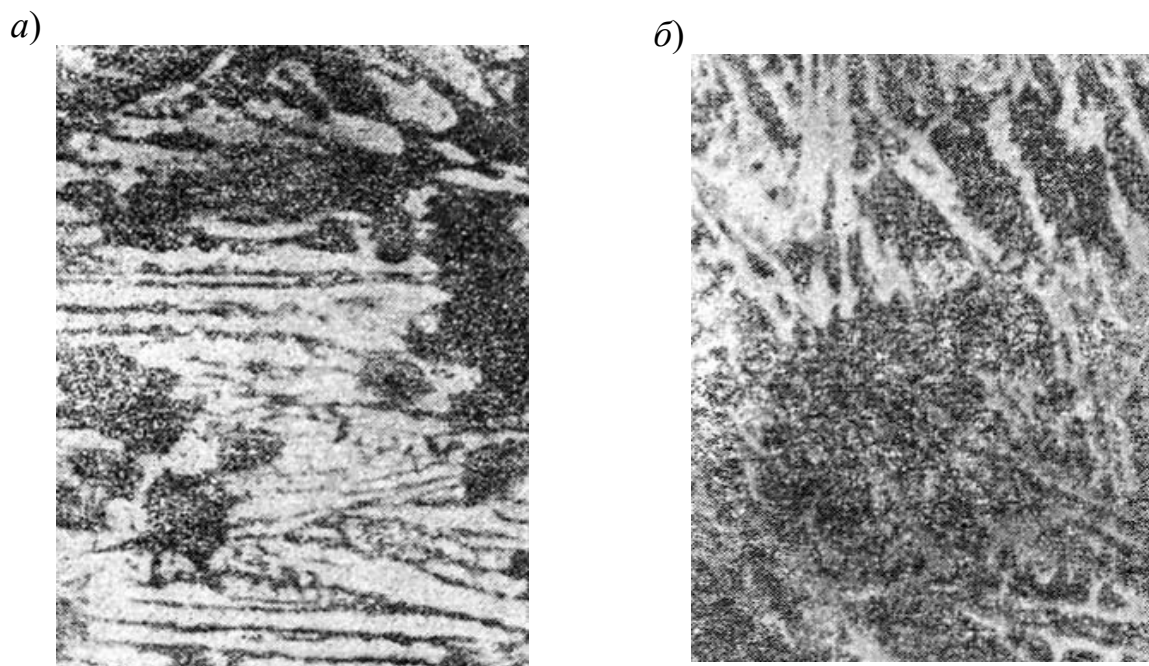
Под влиянием теплового процесса сварки в околошовных участках в области взаимной кристаллизации происходит оплавление по границам зерен аустенита. При холодной сварке (без подогрева) возникают прослойки белого чугуна (рисунок 4.2, а). При горячей сварке (с подогревом) успевает произойти графитизация (рисунок 4.2, б).

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. Возможно в результате переохлаждения аустенита 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.



a – при сварке холодным способом; *б* – при сварке горячим способом

Рисунок 4.2 – Структура серого чугуна в зоне термического влияния

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 феррито-перлитной структуры.

4.2 Оборудование, приборы и материалы

4.2.1 Образцы из низкоуглеродистой стали.

4.2.2 Пост механизированной или ручной дуговой сварки.

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

4.2.4 Металлографический микроскоп.

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

4.2.6 Лупа и набор инструментов для оценки макроструктуры.

4.3 Порядок проведения работы

4.3.1 Тщательно изучить шлифы, выявить качество их полировки и травления. При необходимости произвести повторную полировку и травление.

4.3.2 С помощью микроскопа изучить структуру металла шва и ЗТВ.

4.3.3 Произвести металлографический анализ и зарисовать структуру участков, заданных преподавателем. Зарисовку структур с указанием структурных составляющих осуществить на площади круга диаметром 30 мм.

4.3.4 Определить размер и площадь, занимаемую цементитом (мартенситом), и площадь отдельных цементитных (мартенситных) включений в шве.

4.3.5 Рассмотреть ферритные, перлитные, графитные включения, их количество, размер и форму на заданных участках ЗТВ.

4.3.6 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 Схема формирования структуры ЗТВ.

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

4.4.5 Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1 Что такое цементит?

2 При каких условиях образуется структура отбела (ледебуритная эвтектика)?

3 В чем состоит особенность чугуна как свариваемого материала?

4 Как влияет скорость охлаждения на структуру сварного соединения из чугуна?

5 Как воздействовать на структуру участка неполного расплавления?

6 Почему нежелательно образование закалочных структур в ЗТВ?

7 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 некоторых агрессивных средах. К сварным соединениям из чистой меди почти всегда предъявляют высокие требования по сохранению в металле сварных швов всего комплекса физических свойств: электропроводности, теплопроводности, плотности и коррозионной стойкости, т. к. эти изделия работают в тяжелых условиях эксплуатации. Поэтому в процессе сварки медь не должна загрязняться какими-либо примесями, влияющими на эти свойства.

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 %.

Температура плавления меди М0 – 1083 °С.

Медь в условиях сварки может окисляться за счет газовой атмосферы или за счет обменных реакций с компонентами флюсов или электродных покрытий.

Кислород растворим в твердой меди. При повышении температуры медь активно окисляется, образуя оксид (закись) меди Cu_2O , который при затвердевании образует с медью эвтектику $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$. Располагаясь по границам зерен, эвтектика снижает коррозионную стойкость и пластичность шва. При содержании в меди кислорода более 0,1 % затрудняются процессы горячей деформации, сварки и других видов горячей обработки. 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. Пористость в швах могут вызвать водяные пары, появившиеся в металле в результате реакции с кислородом оксида меди Cu_2O . Водяные пары, накапливаясь в микродефектах металла, создают в них давление, разрушающее металл с образованием микротрещин. Это явление носит название водородной болезни меди.

Низкая стойкость меди и ее сплавов против возникновения пор в швах в основном обусловлена активным взаимодействием меди с водородом и протеканием при этом сопутствующих процессов (образование водяных паров, выделение газообразного водорода). 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, способом сварки и исходным состоянием металла перед сваркой.

Большие тепло- и температуропроводность меди создают высокие градиенты температуры и скорости охлаждения, а также малое время пребывания сварочной ванны в жидком состоянии. Это обуславливает необходимость применения повышенной погонной энергии при сварке меди по сравнению со сталями или применения предварительного подогрева изделия, но последнее является нежелательным осложнением технологии сварки. В связи с этим сварку деталей свыше 10...15 мм обычно выполняют с предварительным и сопутствующим подогревом.

Таким образом, основными трудностями при сварке меди являются:

- легкая окисляемость в расплавленном состоянии, что способствует образованию горячих трещин;
- влияние вредных примесей, усугубляющих склонность к трещинообразованию и охрупчиванию металла швов;
- высокая чувствительность к вредному влиянию водорода;
- склонность к росту зерна и связанному с этим охрупчиванию под влиянием сварочного нагрева в зоне термического влияния.

Дополнительными технологическими трудностями при сварке меди являются высокая теплопроводность, высокий коэффициент теплового расширения, жидкотекучесть.

Одна из главных задач технологии сварки меди заключается в том, чтобы не допустить образования и нейтрализовать вредное влияние оксида Cu_2O . 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.

Вследствие недостаточной прочности технически чистую медь применяют редко в качестве конструкционного материала. Широкое распространение в промышленности имеют сплавы меди – латуни, бронзы. Латунями называют медные сплавы, в которых основным легирующим элементом является цинк. Для повышения механических свойств и химической стойкости латуней в них часто вводят легирующие элементы: алюминий, никель, марганец, кремний. Сплавы меди с оловом, алюминием, кремнием и другими элементами, среди которых цинк не является основным легирующим элементом, называют бронзами. В зависимости от основного легирующего элемента различают две группы бронз: оловянные бронзы и специальные бронзы. Оловянные бронзы, в зависимости от содержания в них других легирующих элементов подразделяют на оловянно-фосфористые, оловянно-цинковые и оловянно-цинко-свинцовые бронзы. Специальные бронзы – это двойные или более сложные сплавы на медной основе, содержащие в качестве добавок алюминий (алюминиевые бронзы), бериллий (бериллиевые бронзы), никель (с добавлением железа – никелево-железная бронза), марганец (марганцевая бронза), кремний (кремниевая бронза), кадмий (кадмиевая бронза), хром (хромовая бронза).

Сварка медных сплавов (бронз) идет удовлетворительно, но в латунях при этом теряется цинк за счет испарения и окисления. Для сварки сплавов меди в защитных газах (Ar и He) можно использовать присадочные проволоки, по составу совпадающие с основным металлом или содержащие небольшое количество раскислителей (Si и Mn).

Алюминиевые сплавы используют в сварных конструкциях различного назначения. Основными достоинствами их как конструкционных материалов являются малая плотность, высокая удельная прочность, высокая коррозионная стойкость. Чистый алюминий, ввиду низкой прочности, для изготовления конструкций используют в отдельных случаях в химической, пищевой и электротехнической промышленности. Температура плавления чистого алюминия 660 °С.

Алюминиевые сплавы разделяют на литейные и деформируемые по пределу растворимости элементов в твердом растворе. В сварных конструкциях в основном используют полуфабрикаты (листы, профили, трубы и др.) из деформируемых сплавов. Деформируемые сплавы разделяют на сплавы, не упрочняемые термической обработкой (с концентрацией легирующих элементов ниже предела растворимости при 20 °С), и сплавы, упрочняемые термической обработкой (имеющие концентрацию легирующих элементов свыше этого предела).

К деформируемым сплавам, не упрочняемым термической обработкой, относятся технический алюминий АД1, АД, алюминиево-марганцевый сплав АМц (Al + 1,3 % Mg) и группа сплавов системы Al–Mg: АМг1, АМг2, АМг3 и АМг6. В сварных соединениях эти сплавы способны сохранять до 95 % прочности основного металла при высокой пластичности и высокой коррозионной стойкости.

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

1 Дуралюмины – сплавы на основе системы Al–Cu–Mg: Д1, Д16, Д19, ВАД1, ВД17, М40, Д18.

2 Авиали – сплавы на основе системы Al–Mg–Si и Al–Cu–Mg–Si: АВ, АД31, АД33, АД35, АК6, АК6-1, АК8.

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 °С), 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, растворяющихся в металле, и косвенной причиной возникновения в нем несплошностей различного рода. 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, снижающие свойства соединений и их работоспособность.

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). В этих условиях возникает необходимость повышения требований к качеству предварительной обработки деталей перед сваркой с целью получения тонкой и однородной пленки по всей поверхности свариваемых кромок.

При подготовке деталей из алюминиевых сплавов под сварку профилируют свариваемые кромки, удаляют поверхностные загрязнения и окислы. Обезжиривание и удаление поверхностных загрязнений осуществляют с помощью органических растворителей или обработкой в специальных ваннах щелочного состава. 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 $0,69 \dots 0,7 \text{ см}^3$ на 100 г металла. Основным источником водорода, растворяющегося в металле шва при аргоно-дуговой сварке, является влага, адсорбированная поверхностью металла и входящая в состав окисной пленки в виде гидратированных окислов. Количество ее определяется состоянием поверхности металла и зависит от обработки его перед сваркой. Предупреждению пористости при сварке алюминия может способствовать сокращение удельной поверхности присадочной проволоки за счет увеличения ее диаметра и уменьшения доли участия присадочного металла в образовании шва. Рациональную обработку поверхности проволоки и основного металла применяют с целью уменьшения толщины окисной пленки и запаса имеющейся в ней влаги.

Свойства сварных соединений зависят также от процессов, протекающих в околошовных зонах. При сварке чистого алюминия и сплавов, неупрочняемых термической обработкой, в зоне теплового воздействия наблюдается рост зерна и некоторое их разупрочнение. Рост зерна и разупрочнение нагартованного металла при сварке изменяется в зависимости от способа сварки, режимов и степени, предшествовавшей нагартовки сплава.

Сварные конструкции из алюминия и его сплавов склонны к короблению, что объясняется относительно высоким коэффициентом теплового расширения. Снижение деформаций в конструкциях может быть достигнуто за счет использования технологических мероприятий (выбор соответствующего способа сварки, подбор оптимальных режимов, подогрев и др.).

Титан – тускло-серый металл с температурой плавления 1668 °С, коррозионно стоек при нормальной температуре даже в сильных агрессивных средах, но очень активен при нагреве выше 400 °С. 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 α -фазы с мелкозернистой структурой, не чувствительной к скорости охлаждения. При температуре выше 882 °С образуется β -фаза с крупным зерном и высокой чувствительностью к скорости охлаждения. Легирующие элементы и примеси могут стабилизировать α -фазу (алюминий, кислород, азот) или β -фазу (хром, марганец, ванадий). Поэтому сплавы титана условно разделяют на три группы: α -, ($\alpha + \beta$)- и β -сплавы. Первые (BT1, BT5-1) термически не упрочняются, пластичны, обладают хорошей свариваемостью. Вторые (OT4, BT3, BT4, BT6, BT8) при малых добавках β -стабилизаторов также свариваются хорошо. Они термически обрабатываются. Сплавы с β -структурой, например BT15, BT22, упрочняются термообработкой. Они свариваются хуже, склонны к росту зерен и к холодным трещинам.

При комнатной температуре поверхность титана растворяет кислород, образуется его твердый раствор в α -титане. Возникает слой насыщенного раствора, который предохраняет титан от дальнейшего окисления. Этот слой называют альфированным. При нагреве титан вступает в химическое соединение с кислородом, образуя ряд окислов от Ti_6O до TiO_2 . По мере окисления изменяется окраска оксидной пленки от золотисто-желтой до темно-фиолетовой, переходящей в белую. По этим цветам в околошовной зоне можно судить о качестве защиты металла при сварке. С азотом титан, взаимодействуя активно при температуре более 500 °С, образует нитриды, повышающие прочность, но резко снижающие пластичность металла. Растворимость водорода в жидком титане больше, чем в стали, но с понижением температуры она резко падает, водород выделяется из раствора. При затвердевании металла это может вызвать пористость и замедленное разрушение сварных швов после сварки.

При сварке титана зона сварки, ограниченная изотермой 350 °С, 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.

Структурные превращения в ЗТВ при сварке титановых сплавов схожи на превращения, наблюдаемые при сварке сталей. Пониженные пластические свойства имеет хорошо выраженный участок роста зерна, размеры которого тем больше, чем выше погонная энергия сварки.

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 Осмотреть шлифы и определить их качество. В случае необходимости переполлировать и протравить шлифы вновь.

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

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

5.3.4 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 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 объёме 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 технологических 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, указанных в 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.

Сопrotивление 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 м²; высота верхней границы зоны от пола – 2,5 м; ширина зоны – 3,0 м; высота нижней границы зоны от пола – 1,0 м.

7 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, кошма, песок, пожарный кран и т. д.);
- при тушении электроустановок огнетушителями не подходить ближе 1 м до очага горения;
- при применении углекислотных огнетушителей не брать голую 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).

8 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.