

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Курганский государственный университет»

Кафедра «Технология и автоматизация сварочного производства»

## ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ СОВРЕМЕННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания  
к выполнению лабораторных работ  
по программе магистратуры 15.04.01 «Машиностроение»,  
направленности «Технология, оборудование и компьютерный инжиниринг  
автоматизированного машиностроения»

Курган 2018

Кафедра: «Технология и автоматизация сварочного производства».

Дисциплина: «Технология сварки современных конструкционных материалов»  
(направления 15.04.01 «Машиностроение», направленности «Технология,  
оборудование и компьютерный инжиниринг автоматизированного  
машиностроения»).

Составил: канд. хим. наук, доц. А. К. Давыдов.

Утверждены на заседании кафедры

« 07 » декабря 2017 г.

Рекомендованы методическим советом университета

« 20 » декабря 2017 г.

## Лабораторная работа № 1 (4 часа)

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА СВАРКИ НА ПЛАВЛЕНИЕ И ПЕРЕНОС ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучить влияние типа покрытия, марки электрода и силы тока на основные характеристики плавления и переноса электродного металла: коэффициент расплава  $\alpha_p$ ; коэффициент наплавки  $\alpha_n$  и коэффициент угара и разбрызгивания  $\psi$ , теоретическую производительность процесса  $G$ .

#### 1.1 НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- 1) сварочный пост постоянного тока;
- 2) весы лабораторные с разновесом;
- 3) секундомер;
- 4) линейка;
- 5) электроды марок УОНИ 13/45 и ОЗС-4 диаметром 4 мм (или другие);
- 6) пластины из низкоуглеродистой стали;
- 7) молоток, зубило.

#### 1.2 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Интенсивность плавления электродного металла определяется тепловыделением в столбе дуги и в ее приэлектродной области, примыкающей к электроду. Перенос расплавленного электродного металла осуществляется через дуговой промежуток (равной длине дуги) под действием силы газодинамического давления в результате образования  $\text{CO}_2$  при разложении газообразующих компонентов покрытия и силы тяжести. При этом часть металлов при переносе не попадает в сварочную ванну, а теряется на угар и разбрызгивание.

Характеристики плавления и переноса электродного металла определяются по формулам:

$$\text{- коэффициент расплавления } \alpha_p = \frac{G_p \cdot 3600}{I \cdot t} \left( \frac{z}{\text{А} \cdot \text{ч}} \right); \quad (1.1)$$

$$\text{- коэффициент наплавки } \alpha_n = \frac{G_n \cdot 3600}{I \cdot t} \left( \frac{z}{\text{А} \cdot \text{ч}} \right); \quad (1.2)$$

$$\text{- коэффициент угара и разбрызгивания } \psi = \frac{\alpha_p - \alpha_n}{\alpha_p} \cdot 100\%; \quad (1.3)$$

- теоретическая производительность

$$G = \frac{\alpha_n \cdot I_{св}}{1000} \left( \frac{\text{кг}}{\text{ч}} \right); \quad (1.4)$$

где  $t$  – время горения дуги, с.

Увеличение тока приводит к повышению температуры дуги, т. е. к интенсивности расплавления электрода и ускорению протекания химических реакций. Следовательно, с увеличением тока  $\alpha_n$  и  $\alpha_p$  увеличиваются, но на разные значения, так как увеличение температуры дуги приводит к увеличению количества образующихся газов и повышению их давления в дуге, а значит и к повышению потерь на угар и разбрызгивание.

Коэффициент расплавления толстопокрытых электродов значительно уменьшается по сравнению с коэффициентом тонкопокрытых электродов, поскольку некоторое количество теплоты дуги расходуется на плавление, испарение и разложение покрытия, но прямой зависимости  $\alpha_p$  от толщины покрытия нет.

Коэффициент потерь  $\psi$  с увеличением толщины покрытия электродов уменьшается за счет того, что материалы покрытий при испарении дают дополнительное количество газа, который увлекает за собой в шов пары металла и мелкие капли.

Коэффициент наплавки  $\alpha_n$  электродов с толстым покрытием обычно меньше коэффициента плавления, за исключением тех случаев, когда в покрытие входит большое количество металлических составляющих.

На  $\alpha_n$  и  $\alpha_p$  оказывают влияние полярность тока, тип соединения, положение шва в пространстве и т.д. Установлено, что род тока существенно их не изменяет. Исследования показали, что  $\alpha_n$  и  $\alpha_p$  будут иметь разные значения (при прочих равных условиях) при сварке электродами различных марок.

### 1.3 НАЗНАЧЕНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДУЕМЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

**ЭЛЕКТРОДЫ УОНИ 13/45.** Сварка особенно ответственных конструкций из углеродистых и низколегированных конструкционных сталей, когда к металлу швов предъявляют повышенные требования по пластичности и ударной вязкости. Сварка во всех пространственных положениях шва постоянным током обратной полярности обеспечивает получение металла швов с высокой стойкостью к образованию кристаллизационных трещин и низким содержанием водорода. Сварку производят только на короткой длине дуги по очищенным кромкам. Покрытие – основное толстое, номинальный коэффициент наплавки –  $9,5 \frac{\text{г}}{\text{А}\cdot\text{ч}}$ ; расход электродов на 1кг наплавленного металла – 1,6кг. При  $d_3=4\text{мм}$  рекомендуемый ток сварки  $I_{\text{св}} = 160\text{--}210\text{А}$ .

**ЭЛЕКТРОДЫ ОЗС-4.** Сварка конструкций из углеродистых сталей с временным сопротивлением до 450МПа во всех пространственных положениях переменным током и постоянным током обратной полярности. Позволяют производить сварку по окисленной поверхности, имеют производительность процесса до  $1,4 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$ . Допускается сварка удлиненной дугой. Покрытие – рутиловое, номинальный коэффициент наплавки –  $9 \frac{\text{г}}{\text{А}\cdot\text{ч}}$ ; расход электродов на 1

кг наплавленного металла – 1,6кг. При  $d_3=4$ мм рекомендуемый ток сварки  $I_{св}=130-170$ А.

#### 1.4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Определить коэффициенты плавления, наплавки и потерь на угар и разбрызгивание при наплавке валиков электродами разных марок на постоянном токе обратной полярности (4-5 значений токов по указанию преподавателя). Минимальный и максимальный исследуемые токи принять на 10-20А соответственно ниже и выше рекомендуемых значений (п.п.3), остальные значения токов равномерно распределить внутри полученного диапазона. Необходимую величину тока устанавливать балластным реостатом. Для получения сопоставимых результатов в каждом из экспериментов наплавить на пластину валик, поддерживая одинаковую и стабильную длину дуги (3-4мм), и оставляя огарки небольшой, примерно одинаковой, длины, учитывая, что в начальный момент сварки скорость плавления электродного стержня небольшая, но по мере разогрева электрода проходящим током скорость его плавления увеличивается.

Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты опытов

Марка электрода	Результаты замеров							
	Длина		Масса распл. части электрода, $G_p$ , г	Сила тока, А	Время горения дуги, с	Масса образца, г		Масса напл. Ме, Гн, г
	до наплавки	после наплавки				до наплавки	после наплавки	

Таблица 1.2 – Результаты расчетов

Результаты расчетов			
$\alpha_p$ , г/А·ч	$\alpha_n$ , г/А·ч	$\Psi$ , %	G, кг/ч

Для определения массы расплавленной части электродного стержня воспользоваться формулой:

$$G_p = \frac{\pi d_3^2}{4} \cdot \gamma \cdot l, \quad (1.5)$$

где  $d_3$  – диаметр электродного стержня, см;

$\gamma = 7,81 \text{ г/см}^3$  – плотность металла стержня;

$l$  – длина стержня, см.

Перед взвешиванием наплавленного образца тщательно удалять шлак и брызги.

Для расчетов  $\alpha_p$ ,  $\alpha_n$ ,  $\psi$  и  $G$  воспользоваться формулами (1.1)-(1.4).

Для каждого из электродов построить функциональные зависимости  $\alpha_p=f(I_{св})$ ;  $\alpha_n=f(I_{св})$ ;  $\psi=f(I_{св})$ ;  $G=f(I_{св})$ .

## 1.5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1 Методика постановки опытов, краткие теоретические сведения, примеры расчетов.

2 Таблица замеров и результатов расчетов.

3 Выводы и объяснения полученных результатов.

## 1.6 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1 От каких факторов зависит производительность электрической сварки плавящимся электродом?

2 Что характеризуют коэффициенты расплавления, наплавки, потерь, их единицы измерения и значения для основных марок электродов?

3 Почему коэффициент плавления в начале и конце плавления электрода разный?

4 Как влияет плотность тока на потери металла при ручной дуговой сварке?

5 В каких случаях коэффициент наплавки может оказаться больше коэффициента плавления?

6 Почему происходит изменение коэффициента потерь на угар и разбрызгивания при изменении длины дуги?

7 В чем принципиальное отличие коэффициентов  $\alpha_p$ ,  $\alpha_n$ ?

## Лабораторная работа № 2 (4 часа)

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПЛАВЛЕНИЯ И НАПЛАВКИ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** изучить влияние режима сварки на коэффициенты расплавления  $\alpha_p$ , наплавки  $\alpha_n$ , разбрызгивания  $\psi$  и производительность  $G$  при полуавтоматической сварке в среде углекислого газа.

#### 2.1 НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- 1) пост в составе полуавтомата А-1230, выпрямителя ВДГ-303, газовой аппаратуры;
- 2) весы лабораторные с разновесом;
- 3) секундомер;
- 4) зубило, молоток, металлическая щетка;
- 5) сварочная проволока 1,2 Св-08Г2С;
- 6) углекислота высшего или первого сорта баллонной поставки;
- 7) пластины из углеродистой стали 100x100 мм толщиной 3÷6 мм.

#### 2.2 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Сварка в  $\text{CO}_2$  является высокопроизводительным механизированным процессом, имеет относительно небольшую стоимость. Основной недостаток – разбрызгивание электродного металла. Вследствие наличия в дуговом промежутке атомарного кислорода в результате диссоциации  $\text{CO}_2$ , имеющего большое сходство с электронами, нарушаются нормальные условия горения дуги при использовании переменного тока. Сварка на постоянном токе, как правило, осуществляется на обратной полярности («минус» – на изделии). При сварке плавящимся электродом большее тепловыделение происходит на катодном пятне дуги, что приводит к большему проплавлению основного металла (это особенно важно при сварке стыковых соединений) и уменьшению расхода проволоки. Прямую полярность применяют в случаях, когда необходимо получить большое количество наплавленного металла, например, наплавочные работы, заварка дефектов в литье. Сварка на прямой полярности характеризуется повышенным разбрызгиванием по сравнению с обратной.

Сила тока при сварке в  $\text{CO}_2$  выбирается из допустимого диапазона плотности тока  $j$  в электроде, которая составляет  $100 \div 300 \text{ А/мм}^2$  и обеспечивает устойчивый дуговой разряд при обратной полярности.

Плавление и перенос электродного металла через дуговой промежуток определяет технологические особенности способа и область его наиболее рационального применения.

Процесс плавления электрода определяется количеством тепла, выделенного на электроде  $q_{\text{э}}$ .

$$q_{\Sigma} = q_{\text{эд}} + q_{\text{эв}},$$

где  $q_{\text{эд}}$  – тепло, выделяемое дугой в активном пятне,

$q_{\text{эв}}$  – тепло, выделяемое в вылете электрода проходящим сварочным током.

Перенос металла может происходить в виде капель различных размеров и пара. При сварке в среде углекислого газа различают следующие основные виды переноса:

- крупнокапельный с короткими замыканиями разрядного промежутка,
- крупнокапельный без коротких замыканий,
- мелкокапельный.

Вид переноса и, соответственно, размеры капель определяются совместным действием силы веса  $F_{\text{т}}$ , отрывающей каплю (при сварке в нижнем положении), силы поверхностного натяжения  $F_{\text{пн}}$ , препятствующей отрыву и электродинамической силы  $F_{\text{эд}}$ , стремящейся сжать жидкую перемычку в месте перехода от твердого электрода к жидкой капле и направленной по радиусу оси сечения шейки капли по всему его периметру. Электродинамическая сила пропорциональна  $j^2$  и способствует отрыву капли. В целом можно сказать, что важнейшим параметром режима, определяющим размеры капель, является ток сварки  $I_{\text{св}}$ . Увеличение тока способствует уменьшению капель за счет электродинамических сил.

Рассмотрим, как влияет сварочный ток на характеристики переноса при обратной полярности. При токах, близких к минимальным, крупная капля на электроде образуется постепенно и долго удерживается на нем, процесс протекает с периодическими короткими замыканиями (1-й вид переноса). Во время короткого замыкания по достижении диаметра перемычки определенной величины происходит мгновенное испарение металла и выброс остатков капли с электрода. Доля потеряннного электродного металла  $\psi$  сравнительно невелика.

При повышении тока процесс протекает уже без коротких замыканий (2-й вид переноса), т. к. диаметр капли становится меньше длины дуги. Разбрызгивание при этом определяется в основном случайным вылетом за пределы шва крупных капель и систематическим выбросом мелких из ванны, что, в целом, увеличивает потери  $\psi$ .

Дальнейшее увеличение  $I_{\text{св}}$  приводит к улучшению процесса переноса металла из-за уменьшения и стабилизации размера капель (3-й вид переноса).

С увеличением силы тока увеличивается количество тепла, выделенное на торце электрода в анодном пятне. В результате характеристики  $\alpha_{\text{р}}$ ,  $\alpha_{\text{н}}$  и  $G$  также монотонно увеличивается.

## 2.3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1 Пост подготовить к работе, произвести маркировку мелом и взвешивание пластин до наплавки с точностью до 1г.

2 Выполнить наплавочные валики при обратной полярности (ОП) на режимах в пределах уже упомянутых в п.2.3 плотностях тока  $j$ , настраивая пост на каждый из них. Для диаметра проволоки 1,2 мм это диапазон токов



$I_{св} 110 \div 330$  А. С учетом технической характеристики применяемого сварочного оборудования назначаем токи  $I_{св}$ :

- 1-й образец – 100 А,
- 2-й образец – 150 А,
- 3-й образец – 200 А,
- 4-й образец – 250 А,
- 5-й образец – 300 А,
- 6-й образец – выполнить наплавочный валик на одном из режимов на

прямой полярности (ПП).

3 Длина расплавленной проволоки определяется как произведение числа оборотов ролика при наплавке (например 10) на длину его окружности (диаметр подающего ролика – 24 мм). Время наплавки фиксируется секундомером.

4 После тщательной очистки от брызг снова произвести взвешивание образцов.

5 Результаты экспериментов занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты замеров

№ п/п, полярность	Ток сварки $I_{св}$ , А	Время сварки $t_{св}$ , с	Масса расплавленной проволоки $G_p$ , г	Масса пластины до наплавки $m_0$ , г	Масса пластины после наплавки $m_1$ , г	Масса наплавленного металла $G_n = (m_1 - m_0)$ , г

Для определения массы расплавленной проволоки воспользоваться формулой:

$$G_p = \frac{\pi d_3^2}{4} \cdot \gamma \cdot L,$$

где  $d_3$  – диаметр сварочной проволоки, см,

$\gamma = 7,8 \frac{г}{см^3}$  – плотность металла,

$L$  – длина расплавленной проволоки, см.

Для расчетов  $\alpha_p$ ,  $\alpha_n$ ,  $\psi$  и  $G$  воспользоваться формулами из работы № 1, свести результаты в таблицу 2.2.

## 2.4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1 Цель работы.

2 Краткие теоретические сведения.

3 Методика постановки опытов, примеры расчетов.

4 Таблицы замеров и результатов расчетов, графики.

$$\alpha_p = f(I_{св}); \alpha_n = f(I_{св}); \psi = f(I_{св}); G = f(I_{св}).$$

5 Выводы и пояснения полученных результатов, сравнение с литературными данными.

## 2.5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1 Чем объясняется технологическая разница сварки в  $\text{CO}_2$  на прямой и обратной полярности?

2 Объясните механизм действия электродинамических сил на формирование и отрыв капли.

3 Почему повышение сварочного тока приводит к уменьшению капель расплавленного металла?

4 При каком виде переноса имеет место наибольшее разбрызгивание?

5 Что происходит при коротком замыкании капли на изделие?

## Лабораторная работа № 3 (6 часов)

### СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРИЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СВАРКИ ПРИ РДС ШТУЧНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** определить степень эффективности штучными покрытыми электродами пучком (гребенкой) электродов, лежащим и наклонным электродами, ванной сваркой.

#### 3.1 НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- 1) многопостовой выпрямитель ВДМ-1601;
- 2) балластный реостат РБ-302;
- 3) весы лабораторные с разновесом;
- 4) секундомер;
- 5) линейка;
- 6) штатив;
- 7) электроды марки УОНИ 13/45 диаметром 4 и 5 мм;
- 8) пластины из низкоуглеродистой стали 200x100x6;
- 9) собранный образец для ванной сварки;
- 10) зубило, молоток, металлическая щетка.

#### 3.2 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Главным недостатком ручной дуговой сварки является сравнительно низкая производительность. Повышение производительности труда может

быть достигнуто за счет двух групп мероприятий: организационных и технических.

К числу организационных мероприятий могут быть отнесены такие, как устройство пунктов питания сварочным током, позволяющим производить быстрое подключение и отключение проводов, рациональное устройство электрододержателя, позволяющего уменьшить время на смену электродов; применение механизированного инструмента для очистки кромок деталей и шва от шлака; приспособлений для быстрого поворота деталей в процессе сварки и некоторые другие. Наряду с организационными мероприятиями, направленными на увеличение производительности труда, большое значение имеет разработка технических мероприятий. Например, если пожертвовать универсальностью РДС и рассматривать узкоспециализированные задачи, в ряде случаев удастся достичь существенного повышения ее эффективности. С технологической точки зрения это сварка спаренным электродом (пучком электродов), ванная сварка, сварка лежачим электродом, сварка наклонным электродом. При этом последние два варианта можно считать автоматизацией процесса.

**3.2.1 СВАРКА СПАРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ (ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОДОВ).** Этот способ сварки заключается в одновременной работе двумя (спаренными) электродами, соединенными между собой путем наложения прихватки в месте зажима их в электрододержатель. Ток подводится одновременно ко всем электродам. Дуга горит между изделием и тем электродом, который находится в данный момент ближе к изделию.

Экономические преимущества сварки пучком электродов, по сравнению со сваркой одинарным электродом сечением, равным сечению одного электрода в пучке, в том, что производительность сварки увеличивается примерно на 30% за счет повышения сварочного тока, уменьшения вспомогательного времени на смену электродов и лучшего использования тепла дуги.

К недостаткам сварки пучком электродов следует отнести практическую непригодность этого метода при вертикальной и потолочной сварке, а также сложность изготовления таких электродов.

**3.2.2 СВАРКА ЛЕЖАЧИМ ЭЛЕКТРОДОМ** – дуговая сварка, при которой неподвижный плавящийся электрод укладывают вдоль свариваемых кромок, а дуга перемещается по мере расплавления электрода. Тавровое соединение сваривается в положении «в лодочку».

Дуга возбуждается между торцом электрода и свариваемым изделием дополнительным угольным электродом. После возбуждения дуга перемещается по длине электрода, постепенно расплавляя электрод и основной металл, образуя валик. Сварка лежачим электродом особенно удобна в труднодоступных местах. При этом способе сварки длина покрытой части электрода принимается равной длине шва. Длина электрода может быть в пределах до 1200 мм, диаметр – до 8 мм. Толщина электродного покрытия

несколько больше, чем при обычной электродуговой сварке плавящимся электродом. Сечение шва получается примерно равным сечению электрода.

Сварка лежачим электродом обеспечивает высокое качество металла шва, повышает производительность по сравнению с обычной ручной сваркой в 1,5-2 раза благодаря возможности применения электродов большего диаметра при соответственном увеличении силы тока, уменьшает потери металла на угар и разбрызгивание. Кроме того, при сварке лежачим электродом сварщик (оператор) может обслуживать несколько постов.

Недостатками этого способа сварки являются: невозможность регулирования сечения валика при данном диаметре электрода, недостаточная глубина провара корня шва, трудность осуществления сварки криволинейных швов и сварки по прихваткам.

**3.2.3 СВАРКА НАКЛОННЫМ ЭЛЕКТРОДОМ** – дуговая сварка, при которой плавящийся электрод расположен наклонно вдоль свариваемой кромки и, по мере расплавления, движется под действием силы тяжести или пружины.

Сварка наклонным электродом известна в двух разновидностях: с постоянным углом наклона, не меняющимся в процессе сварки, с меняющимся углом наклона.

В первом случае сварку ведут наклонным электродом с толстым покрытием под постоянным углом 30-45° к изделию. Нижний конец электрода с выступающим краем толстого покрытия опирается на свариваемое изделие, а верхний конец его закрепляется в электрододержателе, скользящем по направляющей обойме. Дуга возбуждается замыканием конца электрода на изделие угольным электродом. При плавлении электрода на его конце образуется козырек из обмазки, препятствующий короткому замыканию между электродом и изделием. По мере расплавления и опускания электрода, образуется валик. Сечение шва регулируется изменением угла наклона электрода.

**3.2.4 ВАННАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА** плавящимся электродом характеризуется увеличенными размерами сварочной ванны, удерживаемой в специальной форме (стальная или из керамики). Стальную форму приваривают к сварному стыку, керамические формы делают разъемными и после сварки удаляют.

Способ применяют при сварке стержневых изделий (например, железобетонной арматуры и рельсов). Сварку можно вести одним или несколькими электродами. Для ванной сварки пригодны электроды марок УОНИ. Сварку ведут на повышенных режимах, что обеспечивает необходимый нагрев свариваемых элементов для создания большой ванны из жидкого металла.

Сварку начинают в нижней части формы, в зазоре между торцами стержней. Электрод вначале передвигают вдоль зазора. В процессе сварки наплавленный металл должен находиться в жидком состоянии.

### 3.3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.3.1 Собрать на прихватках (свободные от обмазки участки электродов) диаметром 5 мм (2 или 3 штуки), выдерживая их параллельность. Взвесить образец (пластину), произвести наплавку валика без поперечных колебаний, фиксируя время наплавки.

Ток наплавки предварительно подсчитать по формуле:

$$I_{cb} = (20 \dots 30) \cdot n \cdot d_3, \quad (3.1)$$

где  $n$  – количество электродов, в пучке,  
 $d_3$  – диаметр электродного стержня, мм.

Зачистить валик от шлака и образец от брызг металла, взвесить его и определить фактическую производительность сварки пучком по формуле:

$$G_n = \frac{(m_1 - m_0)3,6}{t}, \quad (3.2)$$

где  $m_1$  – масса образца после наплавки, г,  
 $m_0$  – масса исходной пластины, г,  
 $t$  – время наплавки, с.

Аналогично выполнить наплавку одиночным электродом того же диаметра, величину тока взять из паспорта на электроды, вычислить производительность  $G_1$ , оценить эффективность применения сварки пучком по увеличению производительности.

3.3.2 Взвесить образец с разделкой. Для сварки лежачим электродом уложить в разделку собранных кромок электрод диаметром 5 мм отступив от края образца на 30÷40 мм и вставив в электрододержатель, изолированный от сварочного стола. Электрод прижать к стыку валиком флюса толщиной 15-20 мм. Возбуждение дуги произвести угольным электродом, сила тока 200-240 А. Определить фактическую производительность сварки по формуле (3.2), оценить качество формирования шва.

3.3.3 Взвесить образец. Наклонный электрод диаметром 4 мм укрепить под углом  $\sim 45^\circ$  в электрододержателе штатива, проверить свободу хода втулки электрододержателя по стойке. Сила тока устанавливается по паспорту на электрод. Зажигание дуги – угольным электродом. Оценку эффективности сделать в соответствии с п. 3.4.2.

3.3.4 Взвесить собранный на прихватках образец стыкового соединения стержней и заварить его электродом диаметром 5 мм на силе тока 220-250 А. При этом касанием электрода о нижнюю часть торца стержня возбудить дугу и тщательно проплавить ее, добиваясь некоторого количества жидкого металла. Перенести дугу на нижнюю часть торца другого стержня и также тщательно проплавить, заполнить плавильное пространство, перемещая электрод вдоль и

поперек зазора. При подъеме уровня шлаковой ванны до верха формы, придать концу электрода круговые движения по спирали к центру. По окончании сварки периодическим замыканием дуги в центре шва предупредить образование подкорковых трещин. Оценить эффективность способа с позиций производительности  $G_B$  и трудоемкости по сравнению с РДС. Результаты замеров и расчетов свести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Полученные результаты

№ опыта	Способ сварки	Диаметр электрода, $d_э$ , мм	Сварочный ток $I_{св}$ , А	Масса образца до сварки $m_0$ , г	Масса образца после сварки $m_1$ , г	Время сварки, с	Фактическая производительность, кг/час

### 3.4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1 Особенности технологии специальных приемов РДС.
- 2 Методика постановки опытов, их результаты, примеры расчетов.
- 3 Выводы и объяснения полученных результатов.

### 3.5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 В каких практических случаях эффективно применение исследуемых способов?
- 2 Какие причины приводят к повышению производительности при сварке пучком электродов?
- 3 Как при сварке наклонным электродом изменить площадь наплавленного металла?
- 4 Какова роль флюса при сварке лежачим электродом?

## Лабораторная работа № 4 (4 часа)

### ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПРОЦЕССА

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** Исследование влияния скорости подачи электрода на стабильность ЭШ процесса и определение диапазона устойчивого его протекания.

#### 4.1 ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- 1) установка для ЭШС А-550У с трансформатором ТШС-3000;
- 2) технологическая оснастка (поддон, кристаллизатор);

- 3) муфельная печь;
- 4) флюс АНФ-6, затравочная пластина  $\delta = 4$  мм;
- 5) электрод круглого сечения  $\varnothing 30 \div 40$  мм;
- 6) секундомер.

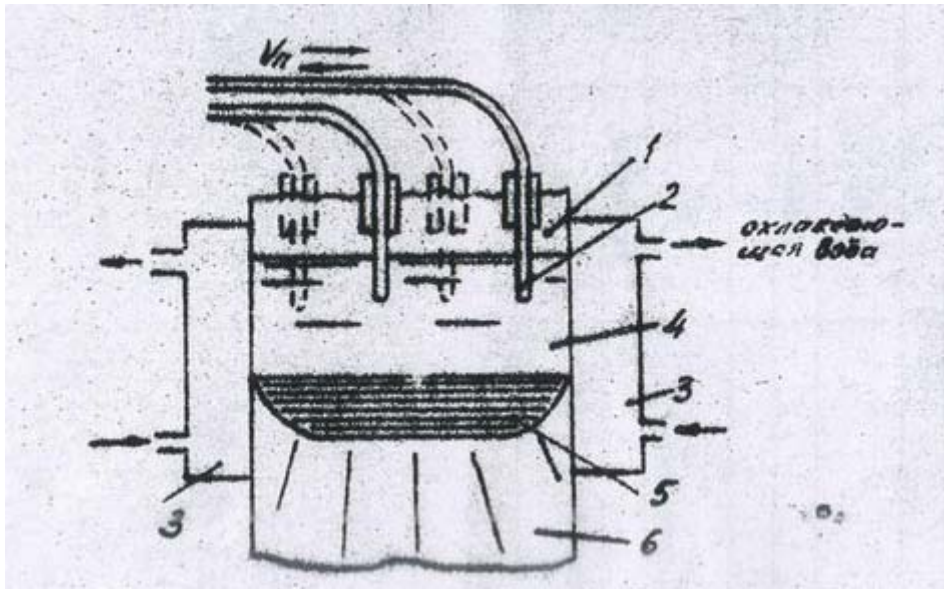
## 4.2 СУЩНОСТЬ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

При прохождении электрического тока через слой расплавленного шлака-электролита в нём выделяется тепло, которое может быть использовано в целях плавления металла. На этом явлении основан широкий круг электрошлаковых технологий ЭШТ: электрошлаковая сварка и наплавка (ЭШС, ЭШН); электрошлаковый переплав (ЭШП); электрошлаковое литье и выплавка (ЭШЛ, ЭШВ).

Принципиальная схема электрошлаковой сварки приведена на рисунке 4.1. В пространстве, образованном кромками сваренных изделий 1 и шлакоудерживающими приспособлениями 3, создаётся ванна расплавленного шлака 4, в которую погружаются токопроводящие электроды 2. Температура шлаковой ванны должна превышать температуру плавления основного и присадочного металлов. При этом шлак расплавляет погруженный в него электрод и кромки свариваемых изделий. Расплавленный металл создаёт металлическую ванну 5, которая кристаллизуясь, образует шов 6. По мере расплавления электрод подаётся вниз. Охлаждающие, шлакоудерживающие приспособления могут быть неподвижными и скользящими (ползуны).

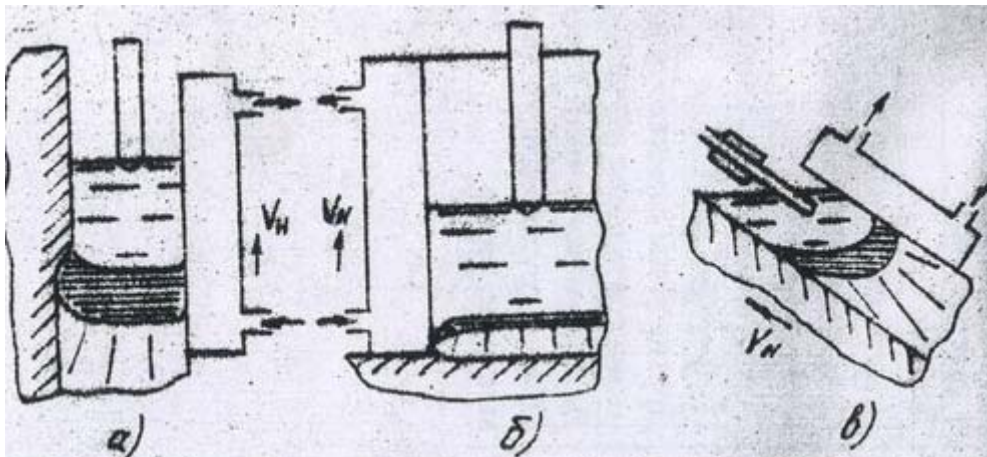
Особенностью ЭШН по сравнению с ЭШС является отсутствие второй оплавленной кромки и возможность ведения процесса с горизонтальным, вертикальным и наклонным расположением наплавляемой поверхности (рисунок 4.2).

Разработка способа ЭШП, в основе которого лежит сварочный электрошлаковый процесс, началось в 50-е годы, после того как было обнаружено, что швы ЭШС обладают весьма высокими механическими свойствами, практически лишены дефектов. Сущность ЭШП состоит в следующем (рисунок 4.3). Расходуемый электрод, изготовленный из металла обычного производства и подключенный к источнику тока, своим торцом погружают в слой расплавленного электропроводного рафинирующего шлака. Капли расплавленного электродного металла спускаются на дно шлаковой ванны и образуют металлическую ванну, которая последовательно затвердевая снизу в водоохлаждаемом металлическом кристаллизаторе, образует слиток. По мере оплавления расходуемый электрод подается в шлаковую ванну, непрерывно восполняя объем кристаллизующейся металлической ванны. Шлакоудерживающее приспособление является формирующим и называется кристаллизатором.



- 1 – кромка свариваемого изделия, 2 – электродная проволока,  
 3 –шлакоудерживающие приспособления, 4 – шлаковая ванна,  
 5 – металлическая ванна, 6 – сварной шов.

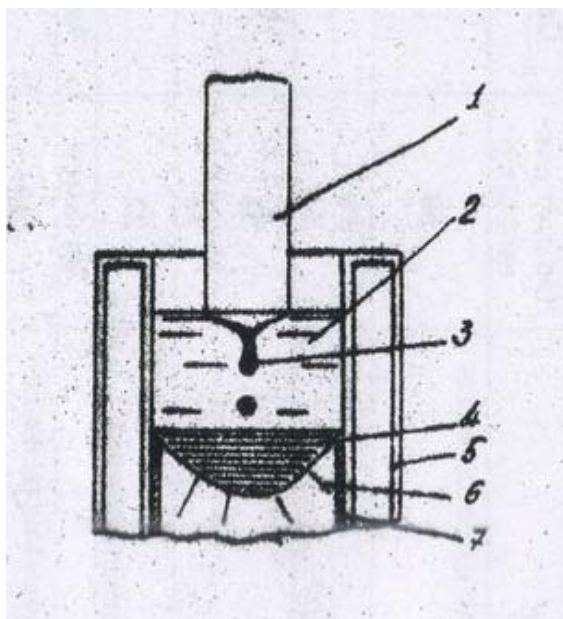
Рисунок 4.1 – Схема ЭШС в вертикальном положении с принудительным формированием шва



- а – наплавка вертикальной поверхности, б – наплавка горизонтальной поверхности, в – наплавка наклонной поверхности

Рисунок 4.2 – Технологические варианты ЭШН





1 – расходуемый электрод, 2 – шлаковая ванна, 3 – капли электродного металла, 4 – металлическая ванна, 5 – водоохлаждаемый кристаллизатор, 6 – слиток переплавленного металла, 7 – шлаковая корочка (гарнисаж)  
Рисунок 4.3 – Схема ЭШП

Электрошлаковое литье – это метод получения отливок фасонных изделий в литейной форме на основе применения электрошлакового процесса плавления расходуемого электрода. При этом достигается получение изделий сложной формы из металла самого высокого качества. В зависимости от степени сложности отливки в настоящее время находят применение три схемы ЭШЛ. По первой схеме металл, идущий на формирование отливок, готовится и кристаллизуется непосредственно в литейной форме как при ЭШП.

Согласно второй схеме процесс ведут с частичным или полным переливом жидкого металла из плавильной ёмкости в полость литейной формы, при этом плавильная ёмкость перемещается относительно неподвижной литейной формы по мере заполнения её металлом.

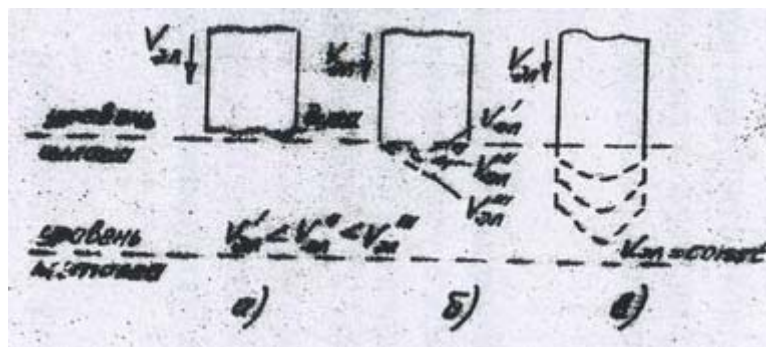
Третья схема применяется при выплавке отливок сложной формы, когда заранее накопленная в копильнике порция ЭШ металла подаётся в литейную форму. Эта технология требует применение специальной футерованной оснастки.

### 4.3 ПЛАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА

Тепло, выделяемое в шлаковой ванне при прохождении электрического тока, используется для плавления электродного металла и поддержания в перегретом состоянии шлаковой и металлической ванн. Основная часть тепла

отводится охлаждающей водой от кристаллизатора и поддона, остальное излучается зеркалом шлаковой ванны, аккумулируется металлом слитка.

Отмечены три основные формы оплавления расходуемого электрода. При малой (недостаточной) скорости подачи электрода его оплавление происходит на поверхности шлаковой ванны. Электрический режим плавки характеризуется неустойчивостью и сопровождается дуговым разрядом между торцом электрода и зеркалом шлаковой ванны. Оплавляющийся электрод имеет плоский торец (рисунок 4.4, а).



а – при недостаточной скорости подачи; б – в области устойчивого процесса;

в – при чрезмерно высокой скорости подачи

Рисунок 4.4 – Характер плавления электрода

С увеличением скорости подачи оплавляющийся конец электрода приобретает коническую форму, ток плавки растёт и стабилизируется, (рисунок 4.4, б) с дальнейшим повышением скорости подачи торец электрода приобретает выпуклую форму, электрод погружается в шлак неоплавляющейся цилиндрической частью. Электрический режим становится неустойчивым из-за шунтирования расплавляющимся металлом сократившегося межэлектродного промежутка (рисунок 4.4, в). В предельном случае возникают дуговые разряды между электродом и металлической ванной. Величина тока при прочих равных условиях связана со скоростью подачи электрода линейной зависимостью.

С увеличением сечения электрода область устойчивого процесса смещается в сторону меньших плотностей тока в электроде. С повышением напряжения область устойчивого процесса перемещается в сторону увеличения плотности тока в электроде.

В случае малого коэффициента заполнения кристаллизатора (отношение площади сечения электрода к площади сечения кристаллизатора) в пределах 0,3-0,4 практически весь ток протекает через слиток, и глубина шлаковой ванны практически не влияет на величину межэлектродного промежутка ( $h_{\text{мэл}}$ ), что ведёт к увеличению погружения электрода в шлак ( $h_{\text{эл}}$ ) (рисунок 4.5).

Сувеличением коэффициента заполнения растёт доля тока, протекающего в цепи кристаллизатора, что приводит к стабилизации процесса оплавления при изменении глубины шлаковой ванны (рисунок 4.6).

В случае ухудшения контакта кристаллизатора с поддоном нормальное токораспределение нарушается, что может привести к пробоя гарнисажа (тонкий слой твёрдого шлака, образующийся на водоохлаждаемой оснастке) и дефектности ЭШ металла. Вероятность возникновения электропробоя увеличивается с ростом коэффициента заполнения кристаллизатора, глубины шлаковой ванны и напряжения процесса.

С изменением токораспределения в шлаковой ванне и соответственно её теплового баланса неразрывно связано изменение ряда показателей процесса ЭШП, в частности – производительности и удельного расхода электроэнергии. В диапазоне устойчивых режимов увеличение скорости подачи электрода и, соответственно, силы тока сопровождается снижением удельного расхода электроэнергии. Увеличение напряжения приводит к повышению температуры шлаковой ванны и производительности процесса, однако удельный расход электроэнергии может и возрасть. Электропроводность шлака, с точки зрения экономических показателей, имеет некоторое оптимальное значение.

Плавающий металл расходуемого электрода переносится через шлаковую ванну в виде капель. На поверхности погруженного в шлак электрода образуется тонкая плёнка жидкого металла, стекающего к вершине конуса. Установлено, что частота отрыва капель с ростом тока увеличивается, а масса капель – уменьшается. С увеличением сечения электрода масса капель увеличивается, с повышением напряжения – уменьшается.

#### 4.4 КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ЭШ МЕТАЛЛА

Достигаемое при ЭШ процессах резкое повышение качества металла в большей степени связано со специфическими условиями его кристаллизации. Главная отличительная особенность в том, что в любой период кристаллизации масса находящегося в жидком состоянии металла во много раз меньше уже закристаллизовавшегося. При этом металл кристаллизуется постепенно и направленно снизу вверх, в условиях непрерывного подвода тепла сверху и отвода тепла в нижнем направлении. Наличие шлакового гарнисажа обуславливает весьма гладкую поверхность отливки. Существенным является также тот факт, что металл, проходя через шлак, эффективно рафинирован от ликвидирующих примесей.

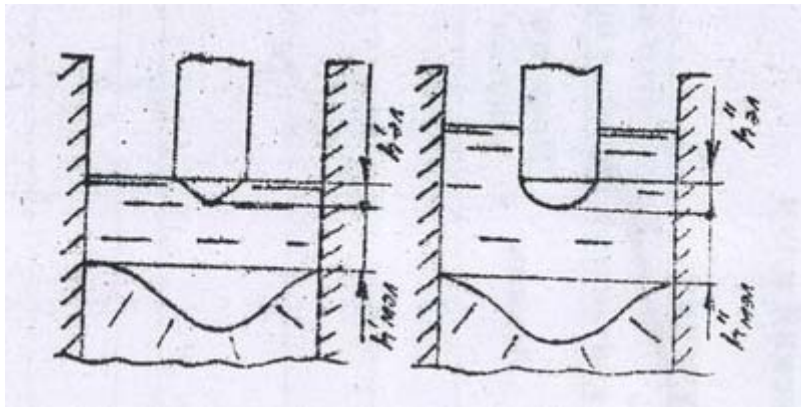


Рисунок 4.5 – Характер плавления электрода при малом коэффициенте заполнения кристаллизатора,  $h'_{\text{мэл}} < h''_{\text{мэл}}$ ;  $h'_{\text{эл}} < h''_{\text{эл}}$

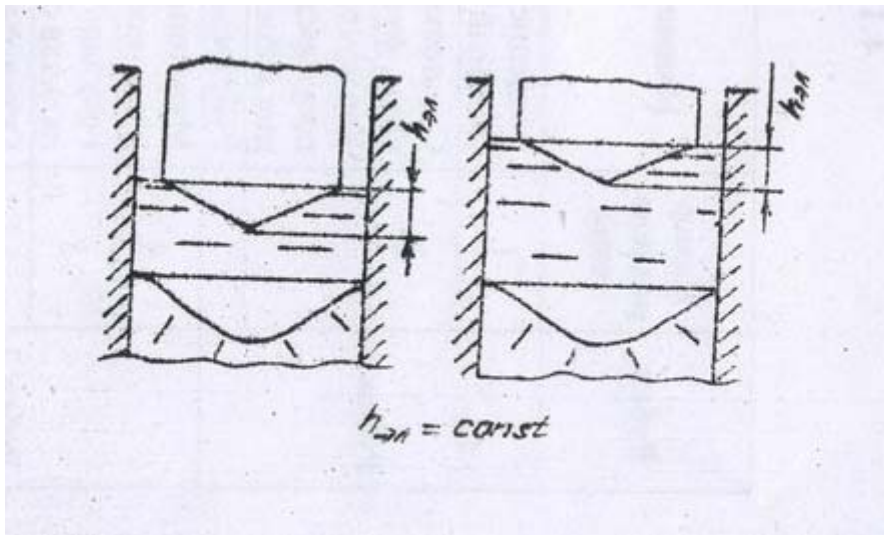


Рисунок 4.6 – Характер плавления электрода при большом ( $>0,6$ ) коэффициенте заполнения кристаллизатора

Все эти факторы определяют плотную и однородную структуру ЭШ металла, состоящую из столбчатых кристаллов, сходящихся под острым углом, направленных нормально к поверхности фронта кристаллизации, т. е. дну металлической ванны.

Увеличение тока ведёт к практически пропорциональному росту глубины металлической ванны и переходу от продольно-осевой к почти радиальной направленности кристаллов, повышение напряжения, наоборот, уменьшает глубину металлической ванны. При неизменном электрическом режиме увеличение глубины шлаковой ванны ведет к уменьшению глубины металлической ванны. Чрезмерно большая глубина металлической ванны может ухудшить качество металла, так как в нём могут «запутываться» частицы шлака. При неизменной скорости плавки увеличения сечения электрода не приводит к изменению глубины металлической ванны, что объясняется рассредоточением зоны тепловыделения в шлаке.

Характер кристаллизации ЭШ металла зависит также от состава шлака. В общем случае шлаки с повышенной электропроводностью позволяют получать более мелкую металлическую ванну.

В некоторых случаях, в крупных электрошлаковых отливках обнаруживаются грубые кристаллизационные полосы, отражающие форму металлической ванны. Содержание ликвирующих элементов в этих зонах значительно превосходит среднее содержание в слитке. Причиной этого явления могут быть резкие изменения теплового состояния расплава в результате нестабильности процесса, подсыпки твёрдого флюса в ходе плавки, перераспределением тока.

К мерам принудительного воздействия на кристаллизацию металла при ЭШП относятся: продувка металлической ванны инертными газами, взаимное перемещение электрода и кристаллизатора, наложение на слиток электромагнитных полей, ультразвука и др.

#### 4.5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1Предварительные работы: установить на поддон затравочную пластину и закрепить ее прижимами, прокалить порцию флюса (600 г) при  $t = 400^{\circ} \text{C}$  в течение 0,5 часов, разместить на поддоне кристаллизатор и зажать в электрододержателе электрод, концентрически сориентировать электрод и кристаллизатор относительно друг друга, в режиме настройки поджечь электродом к затравочной пластине сливную стружку токарной мехобработки стали.

2Настроить установку на среднюю (по шкале пульта управления) скорость подачи электрода и, в автоматическом режиме, получить устойчивое протекание ЭШ процесса с фиксацией тока и скорости подачи электрода.

3Снизить скорость подачи электрода до отрыва от шлаковой ванны, зафиксировать значения тока и скорости подачи в этот момент.

4Увеличивать скорость подачи электрода вплоть до возникновения дугового разряда электрода на металлическую ванну, снова зафиксировать полученные результаты.

#### Содержание отчета

1Краткий конспект информационной части методических указаний.

2Методика выполнения экспериментальной части работы.

3Результаты эксперимента с приведением зависимости  $I_{\text{св}} = f(V_{\text{эл}})$ .

4В выводах по работе отразить количественно полученный диапазон устойчивого ЭШ процесса.

## Лабораторная работа № 5 (2 часа)

### МИКРОПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА, ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

ЦЕЛЮЮ РАБОТЫ является освоение сущности микроплазменной сварки, ее основных особенностей, проведение сварки опытных образцов сварных соединений при настройках параметров режима на основе литературных данных, оценка технологических возможностей способа.

#### 5.1 ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

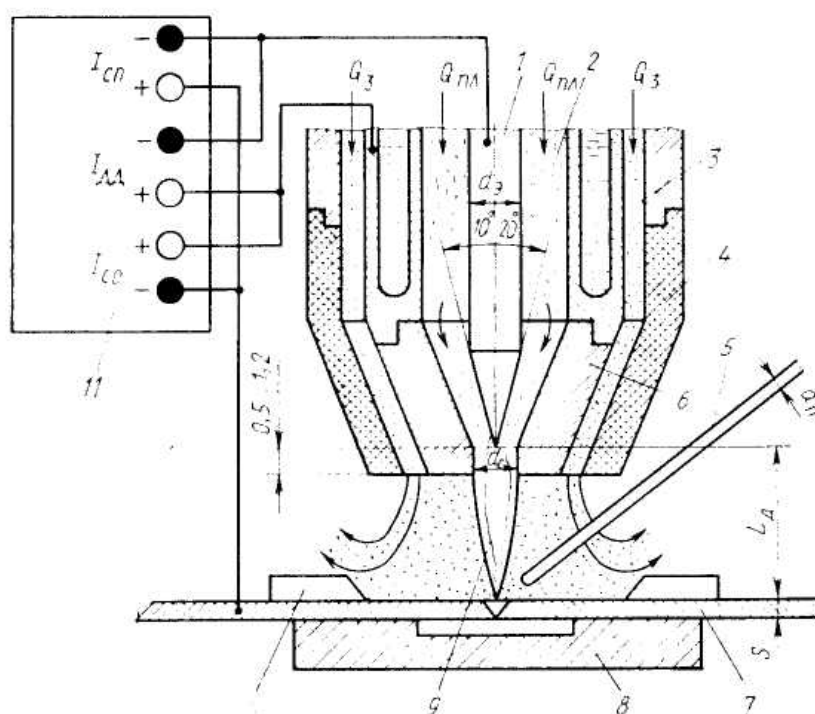
- 1) установка микроплазменной сварки «Microplasma 50» с необходимым комплектом газового оборудования;
- 2) штангенциркуль;
- 3) образцы заготовок для сварки: пластины толщиной 0,2-1 мм из низкоуглеродистой, нержавеющей сталей, меди, стальная проволока  $\varnothing$  1,0-2,0 мм.

#### 5.2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МИКРОПЛАЗМЕННОЙ СВАРКЕ

Получение высококачественных сварных соединений тонких ( $\delta < 1$  мм) и особо тонких ( $\delta < 0,2$  мм) металлов – весьма сложная техническая задача. Потребность многих отраслей промышленности в изделиях из таких металлов непрерывно увеличивается. В начале 60-х годов в ряде организаций были начаты работы по использованию для сварки металлов малой толщины сжатой дугой. Эти работы привели к созданию нового способа – микроплазменной сварки, что подчеркивало основное ее назначение – обработку тонких и особо тонких материалов.

Малоамперная сжатая дуга формируется специальным плазматроном с вольфрамовым электродом (рисунок 5.1). Применение дежурной дуги обеспечивает устойчивое горение основной даже на токе от 0,1 А, позволяющем сваривать металлы толщиной примерно 0,01 мм, что трудно осуществить при использовании аргонодуговой сварки. Это стало возможным при использовании сжатой дуги принципиально иной формы по сравнению с аргоновой.

При микроплазменной сварке сжатая дуга принимает конусообразную форму с вершиной, обращенной к изделию. Такая форма малоамперной сжатой дуги обеспечивается конструктивными особенностями плазматрона, правильным выбором защитного и плазмообразующего газов и их расходом. В качестве плазмообразующего газа используется аргон. У среза сопла столб сжатой дуги существует только в струе аргона. По мере приближения к аноду плазмообразующий и защитный газы все сильнее перемешиваются, и разряд горит уже в смеси этих газов: чем ближе к аноду, тем большее содержание защитного газа. Если же защитный газ имеет большой коэффициент теплопроводности, чем плазмообразующий, то степень сжатой дуги по мере приближения к аноду увеличивается.



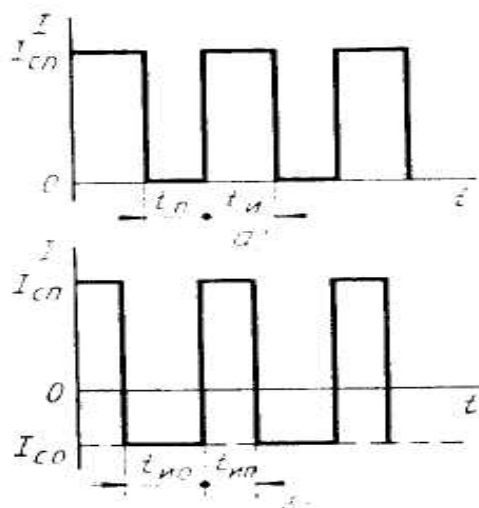
1 – вольфрамовый электрод ( $d_3$ ); 2 – плазмообразующий газ (расход  $Q_{пл}$ ); 3 – защитный газ (расход  $Q_3$ ); 4 – керамическое сопло; 5 – присадочная проволока ( $d_n$ ); 6 – молибденовое сопло; 7 – изделие; 8 – формирующая подкладка; 9 – сжатая дуга (длина дуги  $l_d$ ); 10 – прижим; 11 – источник тока ( $I_{cp}$  – прямая полярность,  $I_{co}$  – обратная полярность,  $I_{dd}$  – дежурная дуга)  
Рисунок 5.1 – Схема процесса микроплазменной сварки

Особо тонкие металлы свариваются импульсной микроплазменной сваркой, сущность которой сводится к следующему. Нагрев и плавление металла происходит в течение импульса тока определенной длительности  $t_n$  дуги прямой полярности (рисунок 5.2). В течение паузы  $t_p$ , когда ток не подается, жидкий металл кристаллизуется и формируется точка. Время импульса и паузы, скорость сварки выбираются так, чтобы обеспечивалась определенная величина перекрытия сварных точек. Импульсная микроплазменная сварка значительно облегчает процесс получения качественного сварного соединения, поскольку можно так подобрать амплитуду и длительность импульса тока, продолжительность паузы, что прожоги металла исключаются даже в случаях остановки плазматрона или его неравномерного перемещения во время сварки.

Для соединения алюминия, магния и их сплавов в ИЭС им. Е. О. Патона разработан процесс микроплазменной сварки на обратной полярности (рисунок 5.3). Особенность способа заключается в том, что применяются два источника питания. Один для непрерывного поддержания дежурной дуги, горящей между тонким вольфрамовым электродом 4 и медным соплом плазматрона 2; другой –

для питания основной дуги 1, горящей между медным соплом 2 (анодом) и свариваемой деталью 3 (катодом). Использование медного водоохлаждаемого сопла в качестве анода основной дуги позволяет исключить влияние тока обратной полярности основной дуги на вольфрамовый катод, тем самым обеспечивается его хорошая стойкость, а его малый диаметр обеспечивает устойчивое горение дежурной дуги на токах 2-5 А.

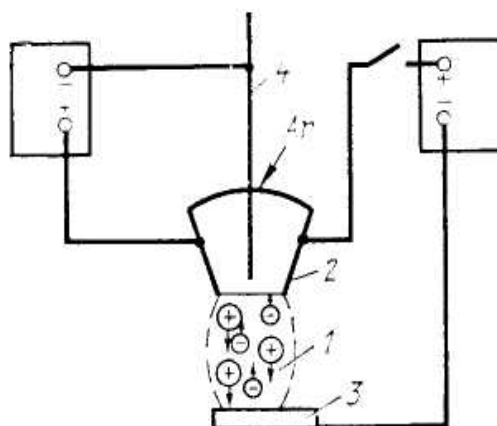
При малых расходах плазмообразующего газа (0,2-0,8 л/мин) анодное пятно основной дуги размещается внутри канала сопла, а сжатие столба дуги на открытом ее участке и вблизи катода обеспечивается защитным газом, так же как и при сварке на прямой полярности. Катодное пятно непрерывно блуждает по поверхности изделия и разрушает тугоплавкую оксидную пленку. Этот способ позволяет соединять алюминий и его сплавы толщиной в десятые и сотые доли миллиметра. Однако блуждание катодного пятна приводит к получению широкого шва и большой зоны термического влияния.



$I_{cp}$  – ток прямой полярности;  $I_{co}$  – ток обратной полярности;  $t_{ин}, t_{п}$  – длительности импульса и паузы,  $t_{инп}, t_{но}$  – длительность импульсов прямой и обратной полярности

Рисунок 5.2 – Осциллограммы импульсного сварочного тока прямой полярности (а) и разнополярного (б)





1 – основная дуга; 2 – сопло плазматрона; 3 – свариваемая деталь; 4 – вольфрамовый электрод

Рисунок 5.3 – Схема микроплазменной сварки на обратной полярности

В 1967 г. впервые в ИЭС им. Е. О. Патона была осуществлена микроплазменная сварка алюминия на переменном токе. Она запатентована в ряде стран: Франция, Италия, ФРГ, Англия, Япония, а также в других странах, и является единственным дуговым способом сварки тонкого алюминия и его сплавов.

Сущность способа заключается в следующем. Между электродом и соплом плазматрона непрерывно горит дежурная дуга постоянного тока. При подаче на сопло положительного относительно изделия полупериода напряжения, между соплом и изделием формируется сжатая дуга обратной полярности с нестационарным катодным пятном, разрушающим оксидную пленку. Затем на вольфрамовый электрод плазматрона поступает отрицательный относительно изделия полупериод напряжения. При этом генерируется сжатая дуга с большой плотностью энергии, достаточной для осуществления сварки металлов, имеющих на поверхности тугоплавкие пленки. Так как по вольфрамовому электроду проходит только ток прямой полярности, то его разрушение не происходит.

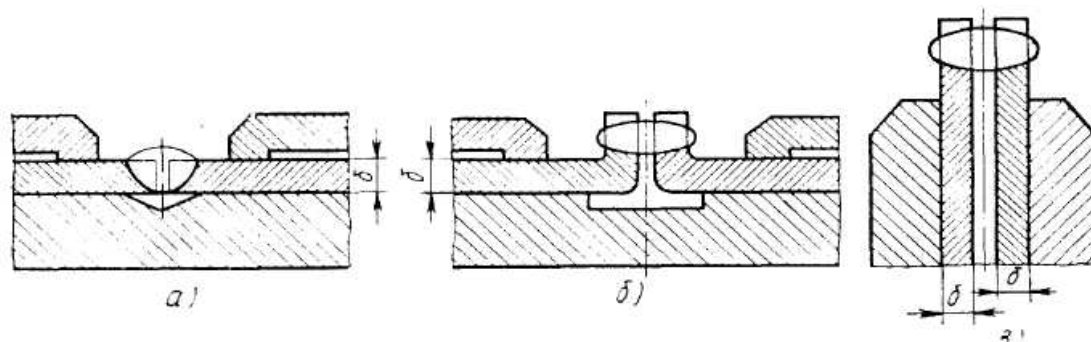
Возможность отдельной регулировки тока прямой и обратной полярности является важным технологическим преимуществом данного способа микроплазменной сварки.

Следующей разновидностью микроплазменной сварки является микроплазменная сварка разнополярными импульсами тока (рисунок 5.2, б). В течение импульса тока прямой полярности передается свариваемым кромкам достаточное количество теплоты, которое расплавляет их, образуя сварочную ванну в виде точки. В течение импульса тока обратной полярности в кромки вводится меньшее количество теплоты, достаточное только для разрушения оксидной пленки. За это время сварочная ванна охлаждается до полной или частичной кристаллизации. Следующий импульс тока прямой полярности

создает сварочную точку на определенном расстоянии от предыдущей. Перекрытие точек задается их размером и шагом.

Для осуществления микроплазменной сварки необходимо иметь установку, включающую: источник питания с блоками управления, плазменную горелку со шлангом, баллоны с плазмообразующим и защитным газами, систему охлаждения и сварочный стол с приспособлениями.

Микроплазменной сваркой можно выполнять стыковые, отбортованные, торцевые (рисунок 5.4) и угловые соединения. Качество сварки зависит от правильной подготовки кромок под сварку, точности сборки и применяемой технологической оснастки. Стыковые соединения (рисунок 5.4, а) рекомендуются при толщине металла  $\delta = 0,3 - 2,0$  мм. Для металла толщиной менее 0,3 мм более технологичными являются стыковые соединения с отбортовкой кромок (рисунок 5.4, б). Торцевые соединения (рис. 5.4, в) рекомендуются для сварки всех металлов и толщин, так как при их выполнении отпадает применение присадочной проволоки и подкладки. Нахлесточные и тавровые соединения не рекомендуются, их следует заменять стыковыми, угловыми или торцевыми.



а – стыковое, б – стыковое с отбортовкой кромок, в – торцевое

Рисунок 5.4 – Типы сварных соединений

Обратная сторона шва формируется либо гладкой технологической подкладкой (при  $\delta \leq 0,3$  мм), либо подкладкой, имеющей канавку овального, треугольного или прямоугольного сечения. Для получения стыковых соединений применяют, как правило, односторонние швы, выполняемые за один проход плазматрона с полным проплавлением кромок на всю толщину металла.

Микроплазменной сваркой выполняются швы во всех пространственных положениях. Известно, что технологически наиболее просто выполняются швы в нижнем положении. Однако особых затруднений в выполнении вертикальных, горизонтальных и потолочных швов не возникает, поскольку объем ванны небольшой. Выполнение таких швов в значительной мере упрощается при импульсной МПС.

Стабильность горения сжатой дуги и качество сварных соединений зависят от формы рабочей части электрода и положения его в канале сопла. Угол заточки рекомендуется выдерживать 10-15°. Острие электрода должно находиться строго по центру канала сопла, конец электрода должен быть погружен в канал сопла не более чем на 0,5 мм. При соблюдении этих требований длина факела плазмы при горении дежурной дуги должна быть не менее 1,5-2 мм.

Основная дуга возбуждается касанием факела дежурной дуги свариваемого металла. После зажигания дуги плазматрон не перемещается до тех пор, пока на кромках не образуется сварочная ванна. После этого подается присадочный металл и плазматрон перемещается в направлении сварки. Угол наклона плазматрона поддерживается в пределах 60-80° при ручной и 80-90° при автоматической сварке (сварка углом вперед). Угол между присадочной проволокой и осью плазматрона составляет примерно 90°. Поперечные колебания плазматроном при МПС не производят. Защитный газ подается еще несколько секунд после отключения основной дуги.

Надежность сварных тонкостенных конструкций зависит от свойств сварных соединений. Они определяются качеством основного металла, присадочной проволоки, защитного и плазмообразующего газов, а также состоянием сборочно-сварочного оборудования и оснастки, квалификацией сборщиков и сварщиков, правильностью сборки и соблюдением заданной технологии и техники сварки.

При разработке технологии сварки любых металлов следует учитывать их свойства. Так, например, низкоуглеродистые полуспокойные и спокойные стали успешно свариваются при использовании в качестве защитного газа аргоно-водородных смесей. Однако кипящие стали склонны к образованию пор, вызываемых взаимодействием углерода с оксидом железа во время кристаллизации шва; этому же способствует и водород, поэтому в защитном газе его содержание не должно превышать 3%.

Чаще всего микроплазменной сваркой изготавливают изделия из коррозионно-стойкой стали аустенитного класса. Ускоренное охлаждение сварного соединения способствует улучшению коррозионной стойкости и повышению пластичности. Сварка этих сталей выполняется в жестких зажимных приспособлениях для уменьшения коробления.

Несмотря на высокую концентрацию энергии малоамперной сжатой дуги, при неправильно выбранных параметрах режима сварки сталей с повышенным содержанием углерода и легирующих элементов в зоне термического влияния и в металле швов, происходят структурные изменения, отрицательно влияющие на качество соединения. Качество сварных соединений коррозионностойких сталей можно оценить по внешнему виду швов. Темная их поверхность свидетельствует о перегреве металла и неудовлетворительной защите. При правильно выбранных режимах и технике сварки швы имеют светлую мелкочешуйчатую поверхность и выпуклую форму с плавным переходом к основному металлу.

Сварочный ток выбирают в зависимости от толщины свариваемого металла и скорости сварки (рисунок 5.5, а). Для каждой толщины металла существует оптимальная скорость сварки (рисунок 5.5, б).

Кроме названных выше сталей микроплазменной сваркой на токе прямой полярности успешно получают изделия из тонколистовой меди и ее сплавов, никеля и его сплавов, титана, серебра и его сплавов, циркония, вольфрама и т.д. причем особенности техники и технологии МПС легко усваиваются сварщиками за короткое время. Необходимо только обеспечить технологичность изделия, правильный выбор режимов сварки и прецизионной оснастки.

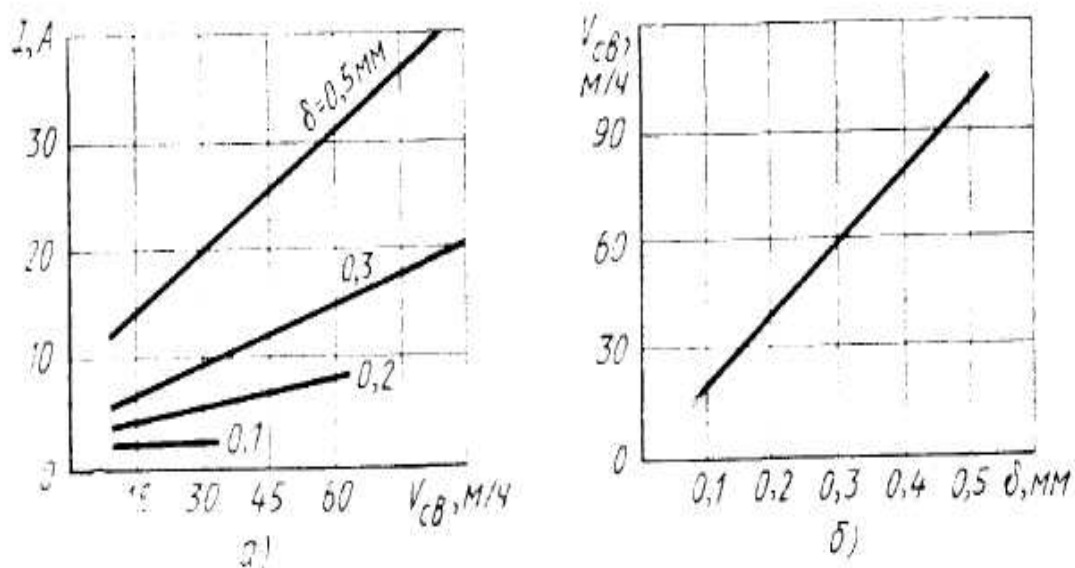


Рисунок 5.5 – Влияние толщины металла на величину сварочного тока (а) и скорость сварки (б)

### 5.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Выполнение этой части работы проводится непосредственно при участии преподавательского состава и учебно-вспомогательного персонала, поскольку это связано с большим количеством настроек необходимых параметров режима сварки.

По сравнению аргонодуговой сваркой при микроплазменном способе имеется большее количество параметров режимов. Помимо расхода защитного газа, величины сварочного тока, диаметра вольфрамового электрода, скорости сварки, диаметра и скорости подачи присадочной проволоки при микроплазменной сварке, следует принимать во внимание расход плазмообразующего газа, ток дежурной дуги, диаметр канала плазмообразующего сопла, длительность импульсов и пауз. При сварке ассиметричным переменным током или разнополярными импульсами немаловажное значение имеют соотношение токов прямой ( $I_{пр}$ ) и обратной ( $I_{об}$ )

полярности (так называемый коэффициент асимметрии тока), а также жесткость режима, характеризуемая соотношением длительности импульсов соответствующих полярностей. Каждый из перечисленных параметров режимов микроплазменной сварки оказывает влияние на качество сварных соединений.

Таблица 5.1 – Режимы микроплазменной сварки листов встык коррозионно-стойких сталей (плазмообразующий газ – аргон: расход 17 л/ч; диаметр сопла 0,76 мм)

Толщина листов, мм	Ток, А	Защитный газ - аргон	Скорость сварки см/мин
		Расход, л/ч	
0,79 0,76	10	12	7,6
		7	12,7
0,25	6	9	20,2
	5,6	8,5	38,1
0,12	2	9	12,7
	1,6		
0,08*	0,3		15,2
			12,7

\* - с отбортовкой кромок

В зависимости от выбранных типов сварных соединений (рисунок 5.4) осуществляется их сборка и опытная сварка с учетом сведений, изложенных в п. 5.2.

По результатам визуального контроля полученных сварных соединений делаются выводы о технологических возможностях микроплазменной сварки в сравнении с дуговыми способами в отношении свариваемых толщин основного металла, качества формирования шва, особенностей техники сварки.

### Лабораторная работа № 6 (2 часа)

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ СТАЛЕЙ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** Изучить технологические особенности основных способов термической резки металлов и оценить сравнительные технические возможности плазменной резки металлов.

## 6.1 ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- 1) сварочный пост постоянного тока с измерительными приборами;
- 2) компрессор или баллон со сжатым воздухом;
- 3) система плазменно-дуговой резки Hyperthermpowermax 45;
- 4) воздушно-дуговой резак РВД-1 или др.;
- 5) сварочный щиток, рукавицы, кузнечные клещи;
- 6) весы лабораторные, разновес;
- 7) секундомер;
- 8) линейка;
- 9) пластины из низкоуглеродистой и легированной сталей,алюминиевого и медного сплавов толщиной в пределах 2-10 мм;
- 10) электроды: графитовые или угольные, толстопокрытые диаметром 5 мм.

## 6.2 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При дуговой сварке расплавленный металл удаляется из зоны реза механическим воздействием сварочной дуги и под действием собственной силы тяжести. Этим методом можно резать низкоуглеродистые стали, легированные, цветные металлы и чугуны.

Резку электрической дугой производят металлическим и угольным электродами. В практике широко применяются обычные толстопокрытие электроды типа Э42, Э46.

Метод резки электрической дугой, наряду с простотой, имеет и некоторые недостатки: низкую производительность процесса, недостаточную чистоту реза, науглероживание кромок при резке угольным электродом, натёки на нижней кромке, большой расход основного металла.

Производительность процесса электродуговой резки определяется количеством выплавленного металла в единицу времени:

$$G_B = \alpha_B \cdot I_{CB} \cdot t, \quad (6.1)$$

$$\alpha_B = G_B / I_{CB} \cdot t, \quad (6.2)$$

где  $G_B$  – количество металла, выплавленного за 1 ч., г;

$\alpha_B$  – коэффициент выплавки, г/А·ч.

Производительность выплавки зависит от силы сварочного тока и угла наклона электрода относительно поверхности обрабатываемого металла. Установлено, что наибольшая производительность будет при угле наклона электрода к изделию  $10^\circ$ . При таком угле наклона повышается эффективная тепловая мощность дуги за счет уменьшения потерь тепла в окружающую среду.

Воздушно-дуговая резка углеродистых сталей эффективна при постоянном токе обратной полярности, а при резке цветных металлов – прямой полярности. При дуге прямой полярности под действием высокой температуры к другим факторам на аноде, плавление металла происходит интенсивно. При этом образуется чашеобразное углубление, по которому растекается расплавленный металл, удаление которого воздухом затруднено. Производительность резко падает. При резке на обратной полярности расплавленный металл образует форму конического выступа за счет движения потока электронов к аноду. Он более подвижен и текуч и легко удаляется струей воздуха.

Основным рабочим инструментом является резак. Существуют резаки с обтекаемой и с боковой подачей воздуха.

Производительность резки и строжки прямо пропорциональна силе тока.

Питание резака сжатым воздухом осуществляется от цеховой сети под давлением 4-6 кг/см<sup>2</sup> (0,4-0,6 МПа) или от сети индивидуального компрессора. Если давление большое – дуга обрывается, если меньше – расплавленный металл слабо выдувается. Вылет электрода не должен превышать 100 мм. При работе электрод «обгорает» и должен периодически выдвигаться на ту же величину. Возбуждение дуги производится при поступлении воздуха. Выплавка металла начинается немедленно, поэтому дугу надо возбуждать в намеченной точке реза. При резке наклон электрода составляет 45-60° по отношению к изделию. При строжке электрод наклоняют под углом 35-45°.

Воздушно-дуговой поверхностной и разделительной резке могут подвергаться цветные металлы и сплавы. Однако применение этого способа для разделительной резки цветных металлов требует повышения погонной энергии ввиду более высокой теплоемкости и теплопроводности этих металлов.

Недостатки, присущие резке угольным и покрытыми электродами, исключаются при плазменной резке металлов. За счет высокой концентрации нагрева при данном способе появляется возможность производить резку большинства металлов на постоянном токе прямой полярности. Физическая сущность: удаление из зоны реза расплавленного металла за счет высокого давления, обеспечиваемого плазменной дугой. Зажигание дуги осуществляется при пробое воздушного промежутка высоким напряжением. Сначала возбуждается дежурная дуга между электродом и соплом, а далее, через систему коммутации, включается рабочая дуга, горящая между электродом и изделием. Основным инструментом при резке является плазматрон. После зажигания рабочей дуги плазматрон на расстоянии 1-2 мм от металла перемещают вдоль линии реза. Расход основного металла при резке значительно ниже, чем при резке покрытыми электродами. При этом отмечается высокая производительность, возможность увеличения разрезаемых толщин, чистота реза, меньший припуск на обработку, вследствие небольшого влияния на свойства металла. Однако данный способ требует использования специального оборудования. В качестве катода используют циркониевые и гафниевые электроды, обладающие высокой стойкостью при нагреве, когда в

качестве плазмообразующего газа используется сжатый воздух. В зависимости от режима резки срок службы катода составляет 3-5 часов.

Достаточно широко также применяется газокислородная резка, основанная на горении металла в кислороде. Т. е. для того, чтобы пошел процесс кислородной резки металл должен быть нагрет, как минимум, до температуры воспламенения металла в кислороде. В качестве горючего газа при резке используются ацетилен, пропан, пропан-бутановую смесь и др. Данный способ обеспечивает простоту процесса и оборудования по сравнению с плазменной резкой. В то же время, с помощью кислородной резки практически невозможно разрезать нержавеющие стали. Не подвергаются кислородной резке цветные металлы и сплавы, а также чугуны, т.к. разрезаемый металл, при этом, должен обеспечивать ряд обязательных требований, а именно: иметь температуру плавления выше, чем температура горения, значительный экзотермический эффект реакции окисления, низкую температуру плавления оксидов.

### 6.3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Опыт 1. Определить производительность процесса и расход материалов при резке электрической дугой низкоуглеродистой стали плавящимся и неплавящимся электродом.

- 1 Заточить электрод под углом 60-90° и закрепить в держателе.
- 2 Зачистить и взвесить пластины и графитовый электрод.
- 3 Рассчитать вес стержня металлического электрода.
- 4 Подобрать силу тока, исходя от диаметра электрода.
- 5 Произвести резку угольным электродом на длине 70-80 м, отмечая силу тока, напряжение и время горения дуги.
- 6 Охладить пластину, очистить из брызг и шлака, взвесить.
- 7 Повторить опыт, выполняя резку покрытыми электродами.
- 8 Повторить опыт для нержавеющей стали.

Опыт 2. Определить производительность при воздушно-дуговой резке, руководствуясь указаниями опыта 1.

Опыт 3. Определить производительность при плазменной резке, руководствуясь указаниями опыта 1. Опыты провести для низкоуглеродистой, высоколегированной стали и сплава цветных металлов (алюминиевый или медный сплав).

Результаты опытов и расчетов занести в таблицу 6.1.

### 6.4 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1 Методика постановки опытов, примеры расчетов.
- 2 Таблица записей и результатов расчетов.
- 3 Выводы и объяснения полученных данных.



Таблица 6.1 – Результаты опытов

Вид резки	Результаты замеров								Результаты расчетов			
	масса электрода, г		масса пробы, г		режим резки				масса, г		коэф-циент выпл-лен-ного мета-лла	произ-води-тель-ность, кг/ч
	до резки	после резки	до резки	после резки	род тока, полярность	сила тока, А	напря-жение, В	время горения дуги, с	израс-ходованных элект-родов	вып-лав-ленного мета-лла		

## 6.5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1 Сущность дуговой и плазменной резки металлов и область их применения.

2 Почему при воздушно-дуговой резке металлов применяют постоянный ток прямой полярности?

3 От чего зависит производительность процесса дуговой резки?

4 Преимущества воздушно-дуговой резки и строжки металлов.

5 Преимущества плазменной резки металлов.

6 Недостатки кислородной резки.

7 Сущность плазменной и газокислородной резки металлов.

8 Требования, предъявляемые к металлам, подвергаемым кислородной резке.

9 Что такое кислородно-флюсовая резка, резка кислородным копьём? Их технологические возможности.

## Лабораторная работа № 7 (4 часа)

### РАСЧЕТ РЕЖИМА СВАРКИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ И ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

ЦЕЛЮЮ РАБОТЫ является определение параметров режима сварки стыковых соединений при сварке в  $CO_2$ , соответствующая настройка сварочного оборудования и сварка образцов на расчетных режимах, оценка полученных количественных характеристик геометрии швов.

#### 7.1 ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

1) пост полуавтоматической сварки в  $CO_2$  в составе:

- полуавтомат типа А-1230М;
- выпрямитель ВДГ-303;
- газовая аппаратура;

- 2) штангенциркуль;
- 3) набор щупов;
- 4) проволока 1,2Св-08Г2С;
- 5) образцы из низкоуглеродистой стали размером 100x50 мм – 6 шт.

## 7.2 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА СВАРКИ

Параметрами режима данного способа являются:

- диаметр электродной проволоки  $d_э$ , мм;
- ток сварки  $I_{св}$ , А;
- напряжение сварки  $U_д$ , В;
- скорость сварки  $V_{св}$ , м/час;
- скорость подачи электродной проволоки  $V_п$ , м/час;
- вылет электрода  $l_э$ , мм;
- расход защитного газа  $q_г$ , л/мин.

В соответствии с ГОСТ 14771-76 в  $CO_2$  без разделки кромок сваривают детали толщиной ( $S$ ) до 10мм. При этом, односторонний шов (соединение С2) и двусторонний симметричный шов (соединение С7) должны отвечать по конструктивным элементам подготовленных кромок, размерам выполненных швов и их предельным отклонением рисунок 7.1, а и рисунок 7.1, б (при толщине свариваемых образцов 5-6 мм).

Глубину провара  $H_{пр}$  при односторонней сварке выбирают в пределах  $H_{пр} = (0,7-0,8)S$ , где  $S$  – толщина свариваемых деталей (мм), а при двусторонней  $H_{пр} = 0,6S$ . Применяемая в экспериментальной части работы проволока  $d_э = 1,2$  мм может использоваться для  $S = (0,8-14)$ мм.

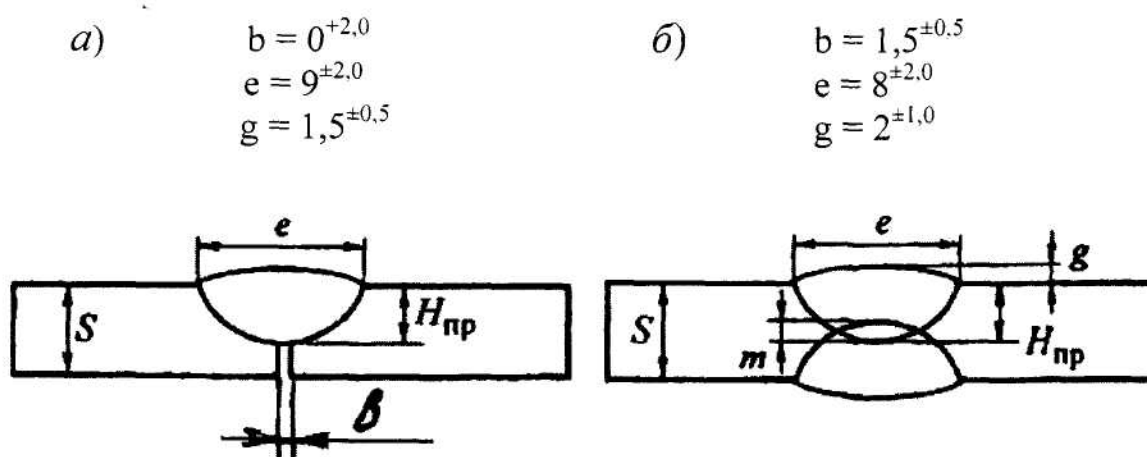


Рисунок 7.1 – Геометрические характеристики стыков и швов соединений:  
а) С2; б) С7

## 2 Определение сварочного тока:

$$I_{св} = \frac{H_{np}}{K_a} \cdot 100, A \quad (1)$$

где  $K_a$  – коэффициент, зависящий от диаметра сварочной проволоки

(при  $d_3 = 1,2$  мм  $K_a = 2,1$  мм/А).

3Вылет электрода ( $l_3$ ) влияет на стабильность процесса и формирование шва. С увеличением вылета возрастает разбрызгивание, при уменьшении – увеличивается набрызгивание на сопло, затрудняется наблюдение за процессом. Вылет  $l_3$  устанавливают опытным путем в зависимости от  $d_3$ . При  $d_3 = 1,2$  мм  $l_3 = (8-15)$  мм.

4Напряжение дуги  $U_d$  влияет на коэффициент формы валика  $\psi_v$  и, с учетом многочисленных табличных сведений и расчетных формул, может изменяться в широких пределах. В данном случае, величина  $U_d$  определяется типом применяемого источника питания и составляет при  $I_{св} = (100-220)$  А ( $20-24$ ) В (определяется по показаниям вольтметра).

5Скорость подачи электродной проволоки  $V_n$  при стабильном протекании дугового процесса должна быть равна скорости ее плавления  $v_{пл}$ , которая, в свою очередь, зависит от сварочного тока  $I_{св}$ , диаметра электрода  $d_3$  и коэффициента расплавления  $\alpha_p$  (г/А·час):

$$V_n = \frac{4 \alpha_p \cdot I_{св}}{\pi d_3^2 \gamma} \left( \frac{м}{час} \right) \quad (2)$$

где  $\gamma = 7,81$  г/см<sup>3</sup> – плотность металла проволоки.

Значения коэффициента расплавления могут быть рассчитаны по формуле:

$$\alpha_p = 3,0 + 0,08 \frac{I_{св}}{d_3}, \frac{г}{А \cdot час} \quad (3)$$

6 Скорость сварки  $V_{св}$  при полуавтоматическом варианте процесса используется для нормирования трудоемкости сборочно-сварочных работ и по техпроцессу не устанавливается. Она задается оператором-сварщиком визуально по признаку номинальных характеристик формирования шва (требуемого катета углового и ширине стыкового). Если шов стандартный, расчетную скорость сварки можно определить из выражения:

$$V_{св} = \frac{\alpha_n \cdot I_{св}}{F_n \cdot \gamma}, \left( \frac{м}{час} \right) \quad (4)$$

где  $\alpha_n$  – коэффициент наплавки, г/А час;  
 $F_H$  - площадь наплавленного металла,  
 $\text{мм}^2$ . Значения  $\alpha_n$  определяются по формуле:

$$\alpha_n = \alpha_p \left(1 - \frac{\psi}{100}\right), \quad (5)$$

где  $\psi(\%)$  – коэффициент потерь на угар и разбрызгивание. При сварке в  $\text{CO}_2$  он может быть принят равным 10-15%.

7 Удельный расход защитного газа  $q$  и расстояние от сопла до изделия определяется диаметром электродной проволоки и при  $d_3=(1-1,4)\text{мм}$  соответствует (8-16) л/мин и (8-14) мм соответственно.

Результаты расчетов должны быть представлены в виде таблицы.

Таблица 7.1 – Режимы сварки

Тип соедин.	$H_{гp}$ , мм	$I_{св}$ , А	$L_3$ , м	$U_{дв}$ , В	$v_{п}$ , м/час	$\alpha_p$ , г/А час	$V_{св}$ , м/час	$\alpha_n$ , г/А час	$q$ , л/мин
C2									
C7									

### 7.3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Как следует из формулы (2), в конечном итоге, требуемая скорость подачи электродной проволоки целиком зависит от величины  $I_{св}$ . Поэтому, предварительно подобраны несколько настроек источника питания (на пульте дистанционного управления для второй ступени напряжений) и скорости подачи проволоки (резистором плавной регулировки), которые обеспечивают наиболее устойчивой сварочный процесс с минимальным разбрызгиванием.

Образцы с выводными планками предварительно собираются на прихватках с зазорами в пределах приведенных допусков. При наплавке пробных валиков осуществляют дополнительную корректировку режима по  $I_{св}$  согласно расчетов и заваривают исследуемые стыки, выдерживая, по возможности, характеристики валика  $e$  и  $g$ , с выводом дуги на планку. После отделения планки снимают все характеристики провара и валика, а также сравнивают их с ожидаемыми расчетными и требуемыми по ГОСТ 14771-76 значениями.

При этом для определения формы провара используют формулу:

$$\psi_{np} = \frac{e}{H_{np}} = K (19 - 0,01 \cdot I_{св}) \frac{d_{э} \cdot U_d}{I_{св}}, \quad (6)$$

где  $K=0,92$  при плотности тока обратной полярности  $j > 120$  А/мм<sup>2</sup>.

Оптимальные значения формы провара  $0,8 < \psi_{np} < 4$ , а валика –

$$7 \leq \psi_{в} = e/g \leq 10.$$

Площадь на плавленного металла:

$$F_H = 0,73 \cdot e \cdot g + b \cdot H_{np}, \text{ мм}^2 \quad (7)$$

Результаты отражают в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Геометрические параметры сварных швов

Значения	Тип соединения	e, мм	g, мм	H <sub>np</sub> , мм	Ψ <sub>np</sub>	Ψ <sub>в</sub>	F <sub>H</sub> , мм <sup>2</sup>
Экспериментальные (фактические)	C2						
	C7						
В соответствии с ГОСТ 14771-76	C2						
	C7						
По литературным рекомендациям	C2						
	C7						

После сопоставительного анализа параметров соединений делаются выводы о приемлемости применяемой технологии сварки или, в случае необходимости, ее корректировке.

### Лабораторная работа № 8 (4 часа)

#### КОРРЕЛЯЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛА ШВА С ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМА СВАРКИ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** является определение зависимости глубины проплавления  $H_{np}$ , ширины шва  $e$ , высоты усиления  $g$  и доли электродного металла в металле шва, от скорости сварки. Ознакомление с методикой расчета химического состава металла шва и определение его механических свойств.

#### 8.1 ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- 1) пластины из низкоуглеродистой стали 200x80x10 – 2 шт;

- 2) флюс АН – 348А;
- 3) сварочная проволока Св–08А или Св–08ГА диаметром 3 мм;
- 4) сварочный трактор АДС – 1000 – 4;
- 5) штангенциркуль;
- 6) линейка.

Форма шва и его размеры (рисунок 8.1) при дуговой сварке характеризуются глубиной провара  $H_{np}$ , шириной шва  $e$ , усилением  $g$ , толщиной шва  $H$ , коэффициентом формы усиления  $\varphi_B = \frac{l}{g}$ , и коэффициентом формы провара  $\varphi_{np} = \frac{l}{H_{np}}$ .

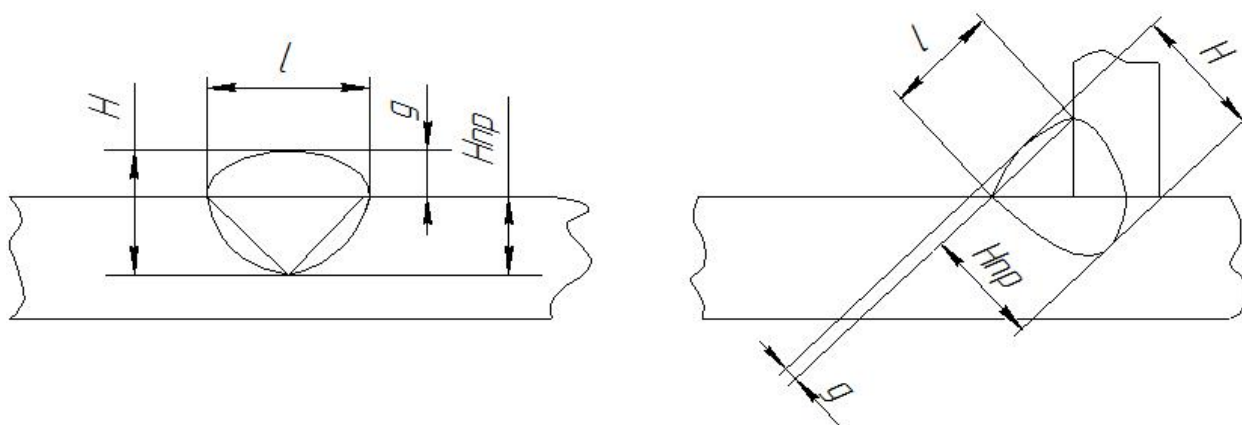


Рисунок 8.1 – Параметры геометрии стыкового и углового швов

От формы шва и его размеров в значительной степени зависит его стойкость против образования кристаллизационных трещин, плавность перехода от основного металла к металлу шва, образование дефектов формирования шва (непровары, подрезы, наплывы и др.)

Форма и размеры шва не зависят от вида соединения, а, в основном, определяются режимом сварки. Режимом сварки называют совокупность факторов, определяющих условия протекания процесса сварки. Сами факторы называют элементами режима сварки.

Элементы режима сварки можно разделить на основные и второстепенные. К основным элементам режима при дуговой сварке относят: ток в А, род и полярность тока, сечение электрода в мм, напряжение в В, скорость сварки в м/ч и при ручной дуговой сварке величина поперечного перемещения конца электрода в мм.

К второстепенным элементам режима при всех способах дуговой сварки относят: величину вылета электрода в мм, состав и строение флюса или состав и толщину покрытия, начальную температуру основного металла, положение электрода в пространстве (вертикальное, наклонное) и положение изделия при сварке.

Рассмотрим влияние некоторых элементов режима сварки на изменение формы, размеров и состава шва.

#### 1 Сварочный ток.

Увеличение сварочного тока приводит к увеличению эффективной тепловой мощности дуги  $q$ , вследствие чего увеличивается глубина проплавления, количество расплавленного основного металла и электродного металла. Расплавление основного металла идет более интенсивно. В результате этого доля основного металла в металле шва увеличивается. Доля электродного металла в металле шва – это отношение площади наплавленного металла ( $F_{эл.}$ ) к сумме площадей проплавленного и наплавленного металла ( $F_{пр.} + F_{эл.}$ ), т.е.

$$\gamma_{эл.} = \frac{F_{эл.}}{F_{пр.} + F_{эл.}}. \quad (1)$$

#### 2 Напряжение на дуге.

Изменение напряжения на дуге вызывает незначительное изменение глубины провара и значительное изменение ширины шва. Увеличение напряжения приводит к уменьшению доли электродного металла в мм. Уменьшение напряжения к увеличению доли электродного металла в металле шва.

#### 3 Род и полярность тока.

При сварке постоянным током обратной полярности глубина проплавления на 40-50 % больше, чем при сварке на прямой полярности. При сварке переменным током глубина проплавления на 15-20% ниже, чем при сварке постоянным током обратной полярности. Ширина шва при сварке током на прямой полярности уменьшается по сравнению со сваркой постоянным током на обратной полярности, также и по сравнению со сваркой переменным током. Доля электродного металла в металле шва при сварке током обратной полярности ниже, чем при сварке на прямой полярности и при сварке переменным током на тех же режимах, что и в первом случае.

#### 4 Скорость сварки.

При изменении скорости сварки глубина провара изменяется незначительно.

Ширина шва при увеличении скорости сварки уменьшается, а при уменьшении скорости сварки ширина шва увеличивается.

## 8.2 РАСЧЕТ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МЕТАЛЛА ШВА

Зная доли основного и электродного металла в металле шва при сварке под флюсом и, учитывая взаимодействие металла сварочной ванны с газовой фазой и шлаком, можно определить расчетный химический состав металла шва.

Содержание элементов в металле шва определяются по формуле:

$$[R_{ш}] = \gamma_{эл.}[R_{эл.}] + (1 - \gamma_{эл.})[R_0] \pm \Delta R, \quad (8.2)$$

где  $[R_{ш}]$  – расчетное содержание элемента в металле шва, в %;

$[R_0]$  – аналитическое содержание элемента в основном металле, в %;

$[R_{эл.}]$  – аналитическое содержание элемента в электродной проволоке, в %;

$\gamma_{эл.}$  – доля электродного металла в металле шва;

$\Delta R$  – коэффициент усвоения, определяющий переход данного элемента из составляющих флюса в металл шва (+), или из металла шва в окружающую среду или шлак (-).

Значения величин  $[R_0]$ ,  $[R_{эл.}]$  и  $\Delta R$  приведены в таблицах 8.1, 8.2, 8.3.

Таблица 8.1 – Химический состав стали  $[R_0]$

Марка стали	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	As
ВСт 3сп	0.14-0.22	0.40-0.65	0.12-0.30	≤ 0.04	≤ 0.05	≤ 0.30	≤ 0.30	≤ 0.30	≤ 0.08
20Г	0.17-0.24	0.70-1.00	0.17-0.37	≤ 0.04	≤ 0.04	≤ 0.25	≤ 0.25	-	-
09Г2С	≤ 0.12	1.30-1.70	0.50-0.80	≤ 0.035	≤ 0.040	≤ 0.30	≤ 0.30	≤ 0.30	-
15ХСНД	0.12-0.18	0.40-0.70	0.40-0.70	≤ 0.35	≤ 0.040	0.60-0.90	0.30-0.60	0.20-0.40	-

Таблица 8.2 – Химический состав сварочной проволоки  $[R_{эл.}]$

Марка проволоки	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P	Mo
Св-08	≤ 0.10	0.35-0.60	≤ 0.03	≤ 0.15	≤ 0.30	≤ 0.040	≤ 0.040	-
Св-10ГА	≤ 0.12	1.10-1.40	≤ 0.03	≤ 0.20	≤ 0.30	≤ 0.025	≤ 0.030	-
Св-10НМА	0.07-0.12	0.40-0.70	0.12-0.35	≤ 0.20	1.00-1.50	≤ 0.025	≤ 0.020	0.40-0.55

Таблица 8.3 – Значения коэффициентов усвоения при сварке под флюсом АН – 348А  $[\Delta R]$

Значение, в %			
$\Delta Mn$	$\Delta Si$	$\Delta S$	$\Delta P$
+(0.17-0.16)	+(0.12-0.13)	-(0.03-0.35)	+0.08



### 8.3 МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Многочисленными экспериментами установлено, что в довольно широком диапазоне легирование различными элементами вызывает изменение механических свойств металла шва пропорционально концентрации легирующих элементов, и что при комплексном их легировании действие всех элементов подчиняется закону аддитивности. На основании экспериментальных данных составлены эмпирические формулы для определения ожидаемых механических характеристик металла сварных легированных швов в следующем виде:

- для предела прочности шва, кгс/мм<sup>2</sup>:

$$\sigma_{в.ш.} = 4,8 + 50C + 25,2Mn + 17,5Si + 23,9Cr + 7,7Ni + 70Ti + 8W + \\ + 17,6Cu + 29Al + 16,8Mo, \quad (8.3)$$

- для относительного удлинения металла шва, %:

$$\delta_{ш.} = 50,4 - [21,8C + 15Mn + 49Si + 2,4Ni + 5,8Cr + 6,2Cu + 2,2W + \\ + 6,6Ti] + 17,1Al + 2,7Mo, \quad (8.4)$$

- для ударной вязкости шва при T=20<sup>0</sup>C, кгс/см<sup>2</sup>:

$$a_{н.ш.} = 23,3 - [25,7C + 6,4Mn + 8,4Si + 4Cu + 0,5W + 1,4Mo + 2,4Cr + \\ + 1,6Ni + 15,4Ti] + 18Al, \quad (8.5)$$

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

$$\sigma_{т.ш.} = 0,73 G_{в.ш.}, \quad (8.6)$$

- для относительного поперечного сужения:

$$\psi_{ш.} = 2,32\delta_{ш.} \quad (8.7)$$

Эти формулы справедливы при условии, что суммарная концентрация всех легирующих элементов не превышает 5% и скорость охлаждения металла шва не превышает 2<sup>0</sup>C/с.

## 8.4 МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1 Собрать на прихватках ручной дуговой сваркой без зазора пластины и наплавить валики поперек сборки на трех режимах, отличающихся скоростью сварки  $V_{св.}$  (по указанию преподавателя), каждый следующий валик накладывать на охлажденную поверхность.

2 Используя высокую концентрацию напряжений в корне шва, разрушить сборку ударным изгибом, располагая её на двух опорах.

3 С помощью штангенциркуля и линейки измерить глубину провара  $H_{np.}$ , ширину  $e$  и усиление  $g$  валика.

5 Определить площадь наплавленного (электродного) металла  $F_{эл.}$ , площадь провара  $F_{np}$  по формулам:

$$F_{эл} = 0.73 \cdot e \cdot g, \quad (8.8)$$

$$F_{np} = 0.73 \cdot H_{np} \cdot e. \quad (8.9)$$

и долю электродного металла в металле шва  $\varphi_{эл.}$ . По полученным результатам построить графики изменения  $H_{np}$ ,  $l$ ,  $g$  и  $F_{эл} = f(V_{св.})$ .

5 С учетом практической идентичности теплофизических свойств низкоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей рассчитать химический состав и определить ожидаемые механические свойства металла шва, используя данные таблиц 1 и 2 в комбинации марок основного и электродного металлов по заданию преподавателя.

6 В выводах оценить равнопрочность основного металла и металла шва, соответствия их остальных механических характеристик, используя данные таблицы 8.4.

Таблица 8.4 – Механические свойства сталей

Марка стали	$\sigma_v, \frac{кг}{мм^2}$	$\delta, \%$	$a_{н}, \frac{кг \cdot м}{см^2}$	$\sigma_m, \frac{кг}{мм^2}$	$\psi, \%$
ВСт 3сп	38-49	26	7	25	-
20Г	42	25	-	25	55
15ХСНД	49	21	8.1	34	-
09Г2С	46.1-49.0	21	6.4	32.4	55

## 8.5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1 Что такое режим сварки?

2 От чего зависит форма и размеры шва?

3 Как влияет сварочный ток на геометрию шва?

4 Как влияет напряжение на геометрию шва?

5 Как влияет скорость сварки на геометрию шва?

6 Как влияет род и полярность на геометрию шва?

7 Как влияет угол наклона электрода на геометрию шва?

8 Как влияет положение свариваемого изделия на геометрию шва?

9 Какие химические элементы в большей степени оказывают влияние на предел прочности шва, на относительное удлинение, на ударную вязкость?

### Лабораторная работа № 9 (6 часов)

#### РАСЧЕТ РЕЖИМА И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШВА ПРИ СВАРКЕ ПОД ФЛЮСОМ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: освоить методику расчета режимов автоматической сварки под флюсом

##### 9.1 ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- 1) пластины из низкоуглеродистой стали 200x100x10 □ 2шт;
- 2) флюс АН-348А;
- 3) сварочная проволока ЗСв-08;
- 4) сварочный автомат АБСК-У4;
- 5) штангенциркуль;
- 6) линейка.

##### 9.2 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА

Основные параметры режима механизированной сварки под флюсом, оказывающие существенное влияние на размеры и форму швов: сила сварочного тока  $I_{св}$ ; плотность тока в электроде  $j$ ; напряжение дуги  $U_0$ ; скорость сварки  $V_{св}$ ; скорость подачи проволоки  $V_n$ ; род тока и его полярность.

При определении режима сварки необходимо выбрать такие его параметры, которые обеспечат получение швов заданных размеров, формы и качества.

При двухсторонней сварке стыковых соединений, с симметричными однопроходными швами требуемая глубина провара ( $H'_{np}$ ) может определяться условием:

$$H'_{np} = \frac{S}{2} + (1 \div 3), \text{ мм}, \quad (9.1)$$

где  $S$  – толщина свариваемых деталей, мм.

Однако, это условие недостаточное для определения качества шва. Чтобы швы обладали высокой технологической и эксплуатационной прочностью, необходимо получить определенные значения и других размеров шва, а именно, его ширины ( $e$ ) и высоты валика ( $g$ ). Для автоматической сварки под флюсом значение коэффициента формы провара  $\psi_{np} = \frac{e}{H_{np}}$  должно находиться в интервале  $0,8 \leq \psi_{np} \leq 4$ . При меньшем значении будут получаться швы, склонные к образованию горящих трещин, при большем теряется

рациональность использования тепла дуги. Аналогично для валика необходимый диапазон коэффициента формы усиления составляет  $7 \leq (\psi_g = \frac{e}{g}) \leq 10$ .

Сварочный ток, обеспечивающий требуемое проплавление может быть определен из выражения:

$$I_{св} = \frac{H'_{np}}{K_h} \cdot 100, \quad (9.2)$$

где  $K_h$  – коэффициент пропорциональности, величина которого зависит от условий проведения сварки (таблица 9.1).

Таблица 9.1 – Значения  $K_h$  в зависимости от условий проведения сварки (флюс АН-348)

Диаметр эл. проволоки, мм.	$K_h, \frac{мм}{100А}$		
	Переменный ток	Постоянный ПП	Постоянный ОП
2	1,30	1,15	1,45
3	1,15	0,95	1,30
4	1,05	0,85	1,15
5	0,95	0,75	1,10
6	0,90	-	-

Диаметр проволоки  $d_3$  определяется допустимыми плотностями тока  $j$  из условия устойчивого протекания процесса сварки:

$$d_3 = 1,13 \sqrt{\frac{I_{св}}{j}}. \quad (9.3)$$

Данные для расчета отображены в таблице 9.2.

Таблица 9.2 – Допускаемые плотности тока

$d_3, мм$	2	3	4	5	6
$j, А/мм^2$	65÷200	45÷90	35÷60	30÷50	25÷45

Для сохранения геометрического подобия сварочной ванны необходимо, чтобы коэффициент формы ванны оставался неизменным. При этом, согласно теории распространения теплоты, произведение  $I \cdot V_{св}$  должно поддерживаться в определенных пределах, что позволяет использовать эмпирическое выражение:

$$V_{св} = \frac{A}{I_{св}}, \quad (9.4)$$

где А – коэффициент, значения которого приведены в таблице 9.3.

Таблица 9.3 – Значения коэффициента А

$d_э, мм$	2	3	4	5	6
$A, \frac{A \cdot м}{ч}$	$(8 \div 12) \cdot 10^3$	$(12 \div 16) \cdot 10^3$	$(16 \div 20) \cdot 10^3$	$(20 \div 25) \cdot 10^3$	$(25 \div 30) \cdot 10^3$

Для принятого диаметра электрода и силы сварочного тока определяется оптимальное напряжение дуги с точки зрения устойчивости дугового разряда.

$$U_д = 20 + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{d_э}} \cdot I_{св} \pm 1, \quad В, \quad (9.5)$$

### 9.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШВА

Величина  $\psi_{np}$  зависит, главным образом, от сварочного тока и напряжения на дуге. Как показали результаты экспериментального определения, коэффициент формы провара мало зависит от скорости сварки и в диапазоне скоростей, обычно применяемых при односторонней автоматической сварке под флюсом, приближенно можно принять, что  $\psi_{np}$  от скорости сварки не зависит.

На рисунке 9.1 приведены зависимости  $\psi_{np}$  от величины сварочного тока и напряжения на дуге.

Зная  $I_{св}, d_э, U_д$  по номограммам рисунка 1 находится величина коэффициента проплавления  $\psi_{np}$ .

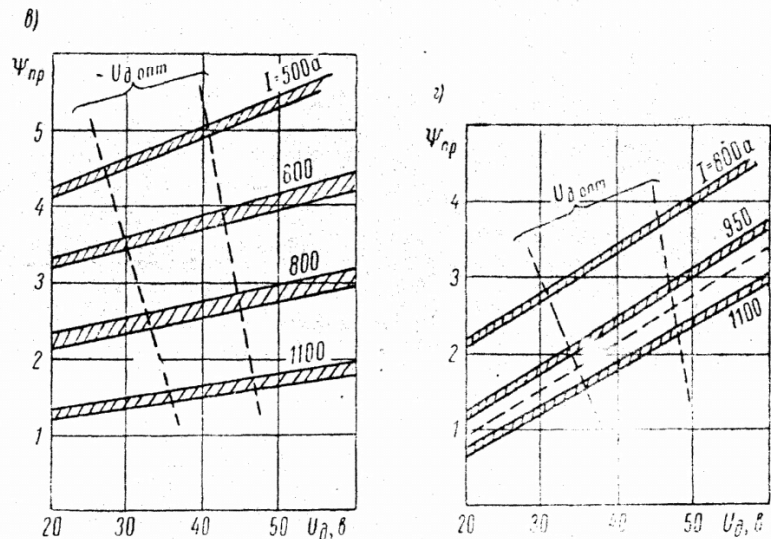
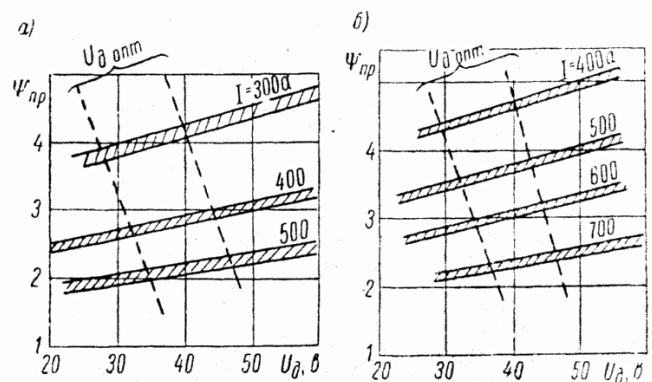
Фактическая глубина проплавления, глубина проплавления  $H_{np}$  (при сварке бескосного соединения) рассчитывается по формуле:

$$H_{np} = 0,0156 \sqrt{\frac{q}{\psi_{np} \cdot V_{св}}}, \quad (9.6)$$

где  $q = 0,24 \cdot I_{св} \cdot U_д \cdot h_u$  – эффективная тепловая мощность дуги, кал/с;

$V_{св}$  – скорость сварки, см/с;

$h_u$  – эффективный КПД нагрева изделия (для сварки под флюсом АН-348А  $h_u = 0,7 \div 0,8$ ).



а –  $d_{эл} = 3$  мм; б –  $d_{эл} = 4$  мм; в –  $d_{эл} = 5$  мм; г –  $d_{эл} = 6$  мм

Рисунок 9.1 – Зависимости  $\psi_{np}$  от величины сварочного тока и напряжения на дуге. Ток переменный. Флюс марки АН-348А

Зная глубину провара, можно определить ширину шва как:

$$e = \psi_{np} \cdot H_{np} \tag{9.7}$$

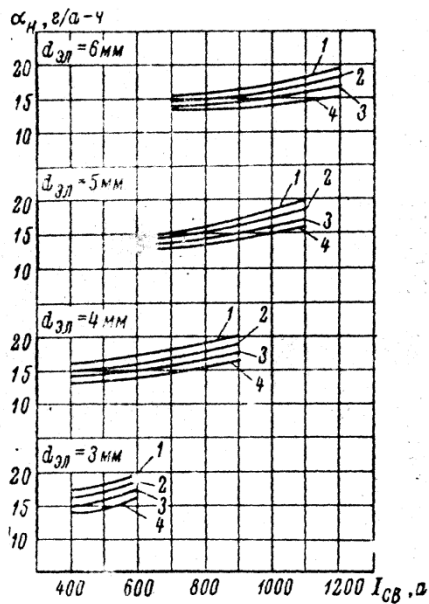
Площадь наплавки  $F_H$  может быть определена согласно уравнению:

$$F_H = \frac{\alpha_H \cdot I_{св}}{100 \cdot \gamma \cdot V_{св}} = F_в, \tag{9.8}$$

где  $F_в$  – площадь валика,  $см^2$ ;

$V_{св}$  – скорость сварки, м/час.

Опытные данные показывают, что в диапазоне режимов автоматической сварки, обеспечивающем удовлетворительное формирование швов,  $F_в$  изменяется в узких пределах и может быть принято равным 0,73.



1 –  $U_d = 32\text{В}$ , 2 –  $U_d = 36\text{В}$ , 3 –  $U_d = 40\text{В}$ , 4 –  $U_d = 44\text{В}$ ;

$\gamma$  – плотность стали  $\left(7,8 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$ ;  $\alpha_n$  – коэффициент наплавки  $\frac{\text{г}}{\text{А} \cdot \text{час}}$

Рисунок 9.2 – Зависимость коэффициента наплавки  $\alpha_n$  от параметров режимов сварки

Для расчета высоты валика (усиления) используем выражение:

$$g = \frac{F_n}{\mu_g \cdot e}, \quad (9.9)$$

где  $\mu_g$  – коэффициент полноты валика ( $\mu_g = 0,73$ ).

Далее определяется  $\psi_g$  и  $\psi_{np}$  и полученные результаты сравниваются с допустимыми значениями этих параметров. Если  $\psi_g < 7$ , необходимо делать разделку, чтобы убрать в нее излишнее количество наплавленного металла. При этом следует иметь в виду, что при разделке глубина провара, определенная по формуле (9.6) изменяется, что следует учитывать при дальнейшем ходе расчета. В тоже время, известно что профиль провара при одном режиме остается практически неизменным, независимо от типа шва.

Тип шва, зазоры и разделка влияют, главным образом на соотношение долей основного и наплавленного металла, а контур провара во всех случаях практически одинаков (рисунок 9.3).

Установлено, что при неизменном режиме общая высота шва остается постоянной ( $H = H_{np} + g$ ) = const как при наплавке, так и при сварке в стык без разделки и с разделкой кромок, а также при сварке угловых швов, что позволяет при сварке на рассчитанном режиме пересчитывать соотношения.

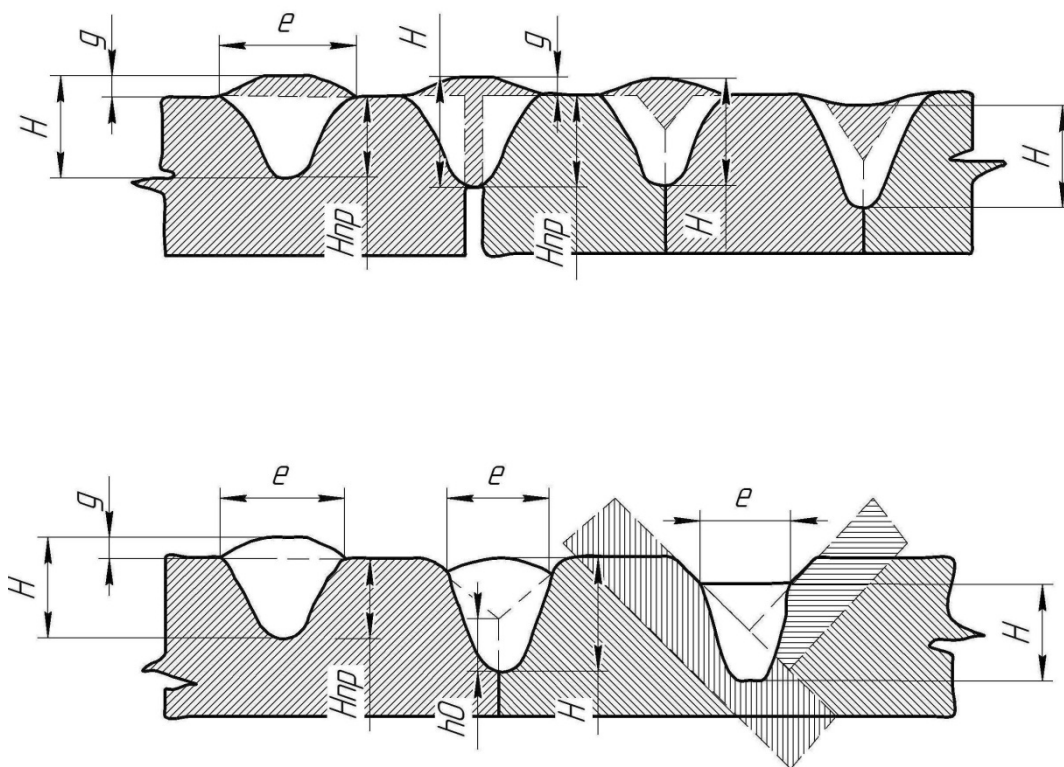


Рисунок 9.3 – Влияние типа шва, зазоров и разделки на профиль провара между основными размерами шва

При этом сначала находят площадь разделки:

$$F_{np} = f^2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, \quad (9.10)$$

где  $f$  – глубина разделки;

$\alpha$  – угол разделки.

Тогда площадь валика при разделке будет  $F_e = F_n - F_p$ , откуда согласно формуле (9.9) можно посчитать высоту валика при сварке с разделкой и, имея в виду, что  $H = \text{const}$ , можно определить и фактическую глубину провара  $H_{np}$ . Аналогично можно определить конфигурацию шва при стыковой сварке с зазором  $\alpha$ , учитывая, что площадь наплавленного металла в зазоре  $F_3 = H_{np} \cdot \alpha$ .

#### 9.4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

- 1 Подобрать необходимые сварочные материалы.
- 2 Собрать на прихватках пластины без зазора.
- 3 Настроить сварочный автомат на полученные расчетом параметры режима сварки.
- 4 Наплавить валик поперек стыка.
- 5 Разрушить образец по стыку ударным изгибом.



6 Замерить все геометрические характеристики наплавленного валика и проплавленной части.

7 Сопоставить полученные результаты с расчетными, оформить их в виде таблицы.

8 Сделать выводы.

## 9.5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1 Какие параметры шва рассчитываются по предложенным методикам?

2 Какие параметры режима сварки рассчитываются по предложенным методикам?

3 Какие параметры режима сварки задаются?

4 Какие параметры режима сварки не рассчитываются по предложенным методикам?

## Лабораторная работа № 10 (2 часа)

### ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ СРЕДНЕ - И ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** изучить методику определения ожидаемой структуры сталей, определить количественно по образцам швов, сваренных по штатной технологии ручной дуговой сваркой (берется из паспорта на электрод), сделать прогноз на вероятность возникновения в шве горячих трещин.

#### 10.1 ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- 1) сварочный пост постоянного тока;
- 2) слесарный инструмент;
- 3) бачок с водой;
- 4) электроды типа ЭА-400/10У Ø 3 мм;
- 5) пластины из нержавеющей стали 08X18H10 толщиной  $\delta = 8$  мм.

#### 10.2 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Высоколегированные стали обладают повышенными механическими свойствами, жаропрочностью, хорошей окалиностойкостью, стойкостью коррозии и воздействия агрессивной среды. Применение этих сталей в промышленности сильно возросло за последние годы. Наибольшее распространение получили стали типа 18-8, которые отличаются устойчивостью против воздействия воздуха и кислот. Они применяются для изготовления конструкций, работающих при температурах до 600-650°, в

редких случаях (если срок эксплуатации конструкции непродолжителен) при более высоких температурах.

При сварке стали 18-8 участки основного металла, расположенные по обе стороны от шва, подвергаются нагреву. В участках, длительное время находящихся под воздействием критических температур (450-850°), может развиваться межкристаллитная коррозия, заключающаяся в том, что пограничные слои зерен под действием агрессивной среды теряют свои антикоррозионные свойства. Это явление есть результат объединения пограничных слоев зерен аустенита хромом вследствие выпадения сложных карбидов железа и хрома по границам кристаллов аустенита. С целью уменьшения склонности стали к межкристаллитной коррозии, уменьшают содержание в ней С или сокращают время пребывания металла в интервале критических температур.

К сварным соединениям из стали типа 18-8 предъявляются повышенные требования. На качество сварных соединений существенное влияние оказывает режим сварки. Чрезмерное увеличение напряжения усиливает окисление Cr, Ti, V (ферритообразующих элементов), так как чем длиннее дуга, тем труднее защитить зону сварки от окружающего воздуха. Поэтому сварку аустенитной стали рекомендуется производить короткой дугой.

Увеличение *силы сварочного тока* при неизменной скорости сварки влечет за собой увеличение объема сварочной ванны. При этом наблюдается укрупнение зерен металла шва, что повышает склонность к межкристаллитной коррозии и образованию горячих трещин, особенно в литых аустенитных сталях.

Повышение *скорости сварки* даже при равной погонной энергии приводит к увеличению скорости кристаллизации и измельчению структуры шва. Отсюда следует, что погонная энергия значительно влияет на свойства околошовной зоны при сварке легированных и высоколегированных сталей.

Свойства сварного соединения во многом зависят и от структуры металла шва. В двухфазном аустенито-ферритном шве первичный феррит залегает в виде отдельных лепестков, основная масса которого образуется внутри кристаллов и лишь небольшая часть – по границам зерен аустенита. Выпадение избыточной фазы богатой хромом будет происходить в местах большого скопления феррита, т. е. внутри зерен. Агрессивная среда при этом, проникая в глубь металла по границам зерен аустенита, будет встречать стойкие (необъединенные хромом) кристаллы аустенита, избыточная фаза из которых выпала внутрь кристалла.

Толщина прослоек между зернами аустенита уменьшится, и стойкость таких швов против межкристаллитной коррозии и горячих трещин повысится по сравнению с чисто аустенитными швами.

Содержание феррита в сварных швах можно определить расчетным путем, пользуясь диаграммой (рисунок 10.1).

### 10.3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Собрать без зазора пластины из стали 08X18H10.

Наложить поперек стыка наплавленные валики по следующим параметрам режима:

1  $J_{св} = 100$  А; ниточный шов.

2  $J_{св} = 90$  А; с поперечными колебаниями.

3  $J_{св} = 80$  А; с поперечными колебаниями.

Разобрать образцы ударами молотка на опорах или в тисках, замерить геометрические параметры валиков. Рассчитать их химический состав с использованием формулы:

$$R_{ш} = R_0\gamma + (1 - \gamma) R_1 \pm \Delta R, \quad (10.1)$$

принимая химический состав основного металла и наплавленного металла электрода согласно таблицы 10.1.

Таблица 10.1 – Химический состав основного и наплавленного металлов

Элементы	C	Mn	Si	Mo	Ni	Cr	V	S	P
Наплавленный металл, мас. %	0,07	2,4	0,48	2,5	10,5	18	0,52	0,020	0,025
Основной металл, мас. %	0,08	2,00	0,08	-	10	18	-	0,020	0,035

По диаграмме Шеффлера установить структурный состав валиков (содержание ферритной фазы) определить вероятность возникновения горячих трещин в зависимости от параметров режима сварки, принимая во внимание литературные рекомендации по оптимальному содержанию первичного феррита 2-6%.

Освоить технологические расчеты для сварки легированных сталей, используя типовые примеры с решениями.

Задача 1. Выбрать электроды для сварки стали 30ХГСА следующего химического состава: C = 0,31%; Mn = 0,9%; Si = 1,0%; Cr = 1,0%, чтобы после сварки структура металла шва получилась мартенситной, если  $\gamma = 0,35$ .

Решение

Принимаем электроды типа Э145-Ф марки НИАТ-3, обеспечивающие получение наплавленного металла следующего химического состава:

C = 0,18%; Mn = 1,5%; Si = 0,5%; Cr = 0,4%.

Рассчитать химический состав металла шва по формуле 10.1:

$$R_{шC} = 0,35 \cdot 0,31 + 0,65 \cdot 0,18 = 0,21\%;$$

$$R_{шCr} = 0,35 \cdot 1,0 + 0,65 \cdot 1,5 = 1,35\%;$$

$$R_{шMn} = 0,35 \cdot 0,9 + 0,65 \cdot 1,5 = 1,29\%;$$

$$R_{шSi} = 0,35 \cdot 1 + 0,65 \cdot 0,5 = 0,67\%;$$

$$R_{шMo} = 0,65 \cdot 0,4 + 0,26\%$$

Определить эквивалент  $C_{иNi}$  (рисунок 10.1):

$$C_{эКВ} = \% Cr + \% Mo + 1,5\% Si = 1,35 + 0,26 + 1,5 \cdot 0,67 = 2,6\%;$$

$$Ni_{эКВ} = 30\% C + 0,5\% Mn = 30 \cdot 0,21 + 0,5 \cdot 1,29 = 6,94\%.$$

По диаграмме Шеффлера определить структуру металла шва. Для данного случая она мартенситная. Следовательно, электроды НИАТ-3 удовлетворяют заданному условию.

Задача 2. Определить, требуется ли подогрев при сварке встык двух деталей толщиной 10 мм из стали 35ХМ следующего химического состава:

$$C = 0,35\%; Mn = 0,55\%; Cr = 0,9\%; Mo = 0,2\%.$$

Решение

Определить эквивалент углерода по формуле:

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

$$+ 0,35 + \frac{0,55}{6} + \frac{0,9}{5} + \frac{0,2}{4} = 0,62\%.$$

Полный эквивалент углерода с учетом влияния толщины определяется по формуле:

$$C'_{эКВ} = C_{эКВ} (1 + 0,005s) = 0,62 \times (1 + 0,005 \cdot 10) = 0,65.$$

При таком эквиваленте подогрев необходим. Температура предварительного подогрева:

$$T_n = 350 \sqrt{C'_{эКВ} - 0,25} = 350 \sqrt{0,65 - 0,25} = 222^\circ C.$$

#### 10.4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Почему двухфазная сталь ( $\gamma + \alpha$ ) менее склонна к горячим трещинам?
- 2 Структурная диаграмма Шеффлера и ее практическое значение.
- 3 Что такое межкристаллитная коррозия, причины ее возникновения и методы предотвращения?
- 4 Почему эквивалент углерода является критерием для оценки необходимости применения подогрева при сварке стали?
- 5 Особенности технологии сварки разнородных и двухслойных сталей.

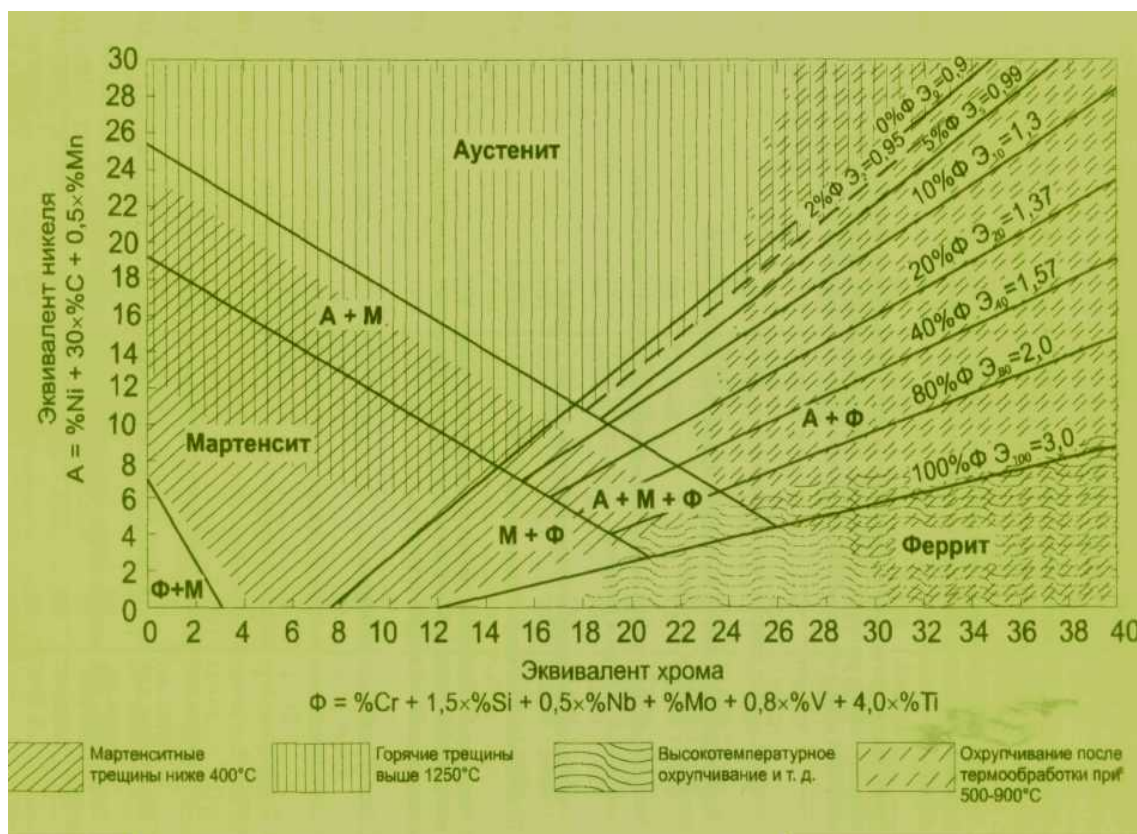


Рисунок 10.1 – Диаграмма Шеффлера

### Лабораторная работа № 11 (2 часа)

## ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ ДУГОВЫМИ СПОСОБАМИ СВАРКИ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** изучение особенностей сварки алюминиевых сплавов дугowymi способами, определение по литературным данным параметров режима, проведение опытных сварочных работ.

### 11.1 СВАРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- 1) пост ручной дуговой сварки на базе инверторного источника КЕМРПИ Macter MLS-2500;
- 2) полуавтомат для сварки плавящимся электродом КЕМРПИ Fastmiq MXF-65 и источником питания Pulse-450;
- 3) установка для аргонодуговой сварки УДГУ-251;
- 4) пластины (образцы) из Al или его сплавов толщиной 2, 4, 6 мм;
- 5) сварочная проволока марки СВА97 Ø 1,2 и 2÷3 мм;
- 6) металлическая щетка;

- 7) ацетон;
- 8) слесарный инструмент.

## 11.2 ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И ОБЩИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ

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. Алюминий высокой чистоты применяют в отраслях новой техники, в том числе при производстве полупроводников. В качестве конструкционных материалов в основном используют полуфабрикаты из алюминиевых сплавов. По показателям отношения прочности и текучести к плотности высокопрочные алюминиевые сплавы значительно превосходят низкоуглеродистые и низколегированные стали, чистый титан и уступают лишь высоколегированным сталям повышенной прочности и сплавам титана.

Алюминий и его сплавы по сравнению со сталями обладают специфическими свойствами, обуславливающим сравнительную сложность осуществления процесса их сварки. К таким свойствам следует отнести следующие: склонность к порообразованию; высокую теплопроводность ( $\lambda = 0,4$  кал/см · сек · град), высокую степень сродства к кислороду и образование стойкого оксида  $Al_2O_3$  в виде пленки, покрывающей поверхность деталей; значительное превышение температуры плавления оксидной пленки ( $2050^\circ C$ ) над температурой плавления алюминия ( $\sim 660^\circ C$ ); высокий коэффициент линейного расширения  $\alpha = (22 \div 24) \cdot 10^{-6}/град$ ; склонность многих сплавов к образованию горячих и холодных трещин; превышение плотности оксидной пленки над плотностью самого металла, снижение прочностных свойств сварного соединения по сравнению с основным металлом; жидкотекучесть; внезапный переход из твердого в жидкое состояние при нагреве; высокую поглощаемость водорода при сварке.

Эти свойства имеют отражение на показателях свариваемости Al-сплавов, которые подробно рассмотрены ниже.

Пористость в сварных соединениях. Основной причиной пористости в алюминиевых сплавах является присутствие в них водорода. Образование пористости зависит от чистоты исходного металла, качества подготовки под сварку поверхности свариваемого и присадочного материалов, чистоты защитных газов, состава защитной атмосферы, качества травления и полноты удаления продуктов травления, способа сварки, параметров сварки, вида переноса капель металла и других факторов.

Основным источником насыщения металла шва атомарным водородом является влага, адсорбированная оксидной пленкой на поверхности сварочной проволоки и свариваемых кромок.

Избыток газообразного водорода в металле объясняется повышением растворимости водорода в жидком алюминии и скачкообразным уменьшением растворимости его в кристаллизующемся металле.

По мере остывания сварочной ванны из-за резкого падения растворимости атомарный водород стремится выделиться, но, встречаясь и объединяясь с другими атомами водорода, с центрами кристаллизации и загрязнениями в металле, рекомбинирует в молекулы и образует газовые пузыри. Эти пузыри всплывают, пока позволяет вязкость окружающего металла. Не успевшие всплыть газовые пузыри, после кристаллизации металла, остаются в нем в виде неплотностей, как правило, сферической формы – газовой пористости.

По уменьшению пористости сварных соединений разработано много рекомендаций.

1 Поверхностная оксидная пленка на присадочной проволоке и основном металле гигроскопична, поэтому для уменьшения пористости следует тщательно удалять ее перед сваркой.

2 Одной из причин возникновения пористости является нарушение газовой защиты шва при сварке. Образование турбулентных потоков газа приводит к перемешиванию воздуха с расплавленным металлом и, как следствие, к повышенному его загрязнению.

3 На увеличение пористости оказывают влияние остатки на поверхности свариваемых и присадочных материалов продуктов травления NaOH, поэтому необходимо обеспечить тщательную промывку деталей и проволоки после травления.

4 Для уменьшения пористости необходимо повышать чистоту присадочной проволоки. При этом следует стремиться к относительному уменьшению площади поверхности присадочной проволоки, т. е. применять присадочную проволоку возможно большего диаметра.

5 Объем пористости в сварных швах алюминиевых сплавов возрастает при увеличении выдержки свариваемых кромок и присадочной проволоки после их обработки до момента сварки. Поэтому необходимо предельно сокращать эту выдержку.

6 Одним из способов уменьшения пористости является правильный выбор защитных газов. Например, при применении в качестве защитной среды смеси Ar – He(65-75% He по объему) пористость уменьшается.

Оксидные пленки. При сварке алюминиевых сплавов существенные затруднения возникают в связи с необходимостью удаления с поверхности свариваемых кромок оксидной пленки. При взаимодействии с кислородом алюминий образует устойчивый оксид  $Al_2O_3$ . Оксидная пленка, покрывающая поверхность деталей, надежно защищает их от дальнейшего окисления. В то же время она затрудняет процесс сварки из-за высокой тугоплавкости и более высокой, чем основной металл, плотности. Оксидная пленка препятствует

сплавлению металла сварочной ванны с основным металлом, а, попадая в шов, становится неметаллическим включением.

Оксидную пленку удаляют химическими или механическими путями либо применением их совместно.

Кроме специальных методов удаления оксидной пленки, очищающее от оксидной пленки действие оказывает электрическая дуга, горящая в защитных газах: аргоне или гелии или их смеси. При сварке на постоянном токе обратной полярности очищающее действие дуги имеет место на протяжении всего процесса ее горения, а при сварке на переменном токе в те полупериоды, когда изделие является катодом. Механизм воздействия электрического тока на оксидную пленку состоит в том, что движущиеся с большой скоростью положительные ионы бомбардируют поверхность сварочной ванны, разрушают пленку оксида и путем так называемого распыления удаляют ее. Действием дуги может быть удалена пленка малой толщины, а пленку большой толщины оксидов алюминия необходимо предварительно удалять механическим или химическим путем.

Склонность к трещинообразованию. Существенным затруднением при сварке алюминиевых сплавов является их склонность к образованию трещин.

Обычно для предупреждения образования горячих трещин при сварке алюминиевых сплавов проводят металлургические и технологические мероприятия. Возможности технологических мероприятий весьма ограничены, это – либо подогрев перед сваркой, который может быть рекомендован не во всех случаях, либо регулирование режимов сварки и режимов охлаждения, либо изменение жесткости закрепления свариваемого узла. Наибольший эффект достигается металлургическими методами, главный из которых – правильный выбор присадочного материала.

Разупрочнение при сварке. При изготовлении сварных конструкций для всех алюминиевых сплавов возникает проблема получения равнопрочности сварных соединений и основного металла.

В сварных соединениях термически неупрочняемых сплавов системы Al-Mg наименьшую прочность имеет металл шва, она составляет обычно 0,85-0,95 прочности основного металла. Во многих случаях этого достаточно, чтобы не предпринимать дополнительных мер с целью повысить прочность металла шва. Равнопрочность можно достигнуть путем увеличения содержания магния в присадочной проволоке.

Значительно больше проблем возникает в случае необходимости получения сварных соединений термически упрочняемых сплавов. В зависимости от температуры и продолжительности ее воздействия степень разупрочнения различна. В некоторых случаях прочность сварных соединений сплавов типа авиаль, дуралюмин может составлять лишь 50% прочности основного металла.



Резкое падение прочности при высоких температурах может привести к разрушению (проваливанию) твердого металла не расплавившейся части кромок под действием веса сварочной ванны. В связи с высокой жидкотекучестью, алюминий может вытекать через корень шва. Размеры сварочной ванны трудно контролировать, так как алюминий при нагреве практически не меняет своего цвета. Для предотвращения провалов или прожогов при однослойной сварке или сварке первых слоев многопроходных швов на большой погонной энергии необходимо применять формирующие подкладки.

### 11.3 ТЕХНОЛОГИЯ ДУГОВЫХ СПОСОБОВ СВАРКИ

Обработка металла перед сваркой. При сварке алюминия и его сплавов решающее значение имеет чистота поверхности свариваемых кромок и присадочного металла, поэтому перед сваркой требуется очень тщательная очистка металла от консервационного покрытия, жиров, влаги, оксидной пленки алюминия и других загрязнений.

Окончательную очистку свариваемых кромок на ширине 15-25 мм производят непосредственно перед сваркой металлической щеткой. Очищенные стальной щеткой кромки тщательно вытирают сухой чистой ветошью для удаления порошкообразных веществ. Подготовленные таким образом кромки пригодны к сварке в течение 5-6 часов. По истечении указанного срока кромки зачищают повторно. Особенно следует подготавливать детали под сварку неплавящимся электродом. Непосредственно перед сваркой следует протереть кромки ацетоном.

Химический способ очистки поверхности деталей сложен и поэтому находит ограниченное применение, главным образом для подготовки мелких деталей. Поверхность прутков и проволоки очищают только химическим способом. Сварочную проволоку желательно погружать в щелочные растворы не в бухтах, а протягивать последовательно через все растворы, подавая непосредственно на рубочный станок или наматывая в кассеты.

Ручная сварка металлическим покрытым электродом. Электродуговую сварку металлическим электродом применяют для соединения массивных листовых конструкций с толщиной металла не менее 5 мм в тех случаях, когда требуется большой объем сварочных работ, а также при заварке дефектов литья из алюминия и его сплавов на массовых изделиях. Сварка возможна только с применением обмазанных электродов с покрытиями из смеси хлоридных и фторидных солей щелочных и щелочно-земельных металлов для эффективного удаления оксидной пленки. Покрытия не допускают применения в качестве связующего жидкое стекло, поскольку оно вступает во взаимодействие с компонентами покрытия и Al. В результате длительно хранить и транспортировать такие электроды затруднительно, что делает их

низкотехнологичными. В настоящее время изготавливают электроды ОЗА-1, ОЗА-2, ОЗАНА-1 и ОЗАНА-2.

Сварку металлическим электродом выполняют в нижнем положении на постоянном токе обратной полярности. Электрод держат строго перпендикулярно к шву, поперечных колебаний ему не придают. Сварку на больших токах выполняют дугой длиной 3-4 мм; дугу передвигают как можно равномернее, что обеспечивает получение плотных швов и уменьшает необходимую температуру подогрева металла перед сваркой.

Предварительный подогрев применяют при сварке металла толщиной 6 мм и выше. Необходимая температура подогрева составляет 100-400° С и возрастает с увеличением толщины металла. При массовом производстве небольших изделий с короткими швами подогрев металла под сварку целесообразно производить в электрических или газовых печах.

Недостатками сварки металлическим электродом является необходимость применения предварительного подогрева и возможность выполнять швы только в нижнем положении. Технологические рекомендации для ручной сварки металлическим штучным покрытием электродом приведены в таблице 11.1.

Таблица 11.1 – Режимы однопроходной ручной сварки металлическим электродом стыковых соединений алюминия и его сплавов без разделки кромок

Толщина металла, мм	Температура подогрева, °С	Диаметр электрода, мм	Сила тока, А
4	-	4	150 – 200
6	100 – 150	5	200 – 280
8	150 – 200	6	300 – 350

Сварка по слою флюса. Флюсы, предназначенные для автоматической сварки сталей, не пригодны для сварки алюминия и его сплавов. В составе этих флюсов отсутствуют компоненты, способные растворить оксиды алюминия и предотвратить их образование. Эти флюсы отрицательно влияют на горение дуги и формирование шва. Они вызывают пористость шва. Из флюса в металл шва переходит большое количество кремния, марганца и железа.

Флюсы и покрытия, используемые при ручной сварке алюминия, при автоматической сварке также не дают должных результатов. Соли, входящие в состав флюса, в расплавленном состоянии шунтируют электрическую дугу, и она гаснет. Кроме того, вследствие выделения большого количества газов происходит разбрасывание флюса. Поэтому для осуществления автоматической сварки алюминия и его сплавов пошли по пути применения открытой дуги и небольшого количества флюса для предотвращения образования оксидов алюминия и удаления образующихся оксидов в шлак. Количество подаваемого флюса таково, что дуга на половину своей длины оказывается открытой, почему этот способ сварки и получил наименование автоматической сварки полукрытой дугой или по слою флюса.

Автоматическую сварку по слою флюса выполняют в нижнем положении на стальных подкладках постоянным током, на обратной полярности специальными автоматами. В результате действия концентрированного источника тепла и равномерного перемещения дуги оказывается возможным выполнять сварку без предварительного подогрева.

В таблице 11.2 приведены режимы сварки стыковых соединений алюминия проволокой АД1. Для каждой толщины металла требуется определенный диаметр алюминиевой проволоки, отклонение от которого ведет к ухудшению качества сварки.

Таблица 11.2 – Режимы сварки стыковых однопроходных швов алюминия проволокой АД1 по слою флюса АН-А1

Толщина металла, мм	Диаметр электрода, мм	Скорость подачи электрода, м/час	Сила тока, А	Напряжение, В	Скорость сварки, м/час	Сечение слоя флюса, мм		
						В	b	h
4	1,0-1,1	634-691	140-160	27-30	24-26	25	14	7
6	1,2-1,3	538-585	170-180	28-31	24-26	36	15	8
8	1,4-1,5	459-477	190-210	29-82	20-22	26	15	9
10	1,6-1,7	410-425	220-250	30-34	20-22	27	18	9

Швы имеют гладкую поверхность, плавные переходы к основному металлу и не нуждаются в калибровке.

Газоэлектрическая сварка. Газоэлектрическую сварку алюминия и его сплавов выполняют неплавящимся (вольфрамовым) или плавящимся электродом.

При сварке неплавящимся электродом источником тепла является дуга, возбуждаемая между электродом и изделием. Конец электрода, дуга и ванна расплавленного металла защищены инертным газом. Основным рабочим инструментом является специальная сварочная горелка, которая служит для крепления электрода и подвода сварочного тока к нему. Поток защитного газа формируется и направляется в сторону сварочной ванны соплом горелки.

Сварку алюминия и его сплавов неплавящимся электродом в среде защитных газов производят переменным током. Для повышения устойчивости горения дуги используют специальные вспомогательные аппараты (осцилляторы и импульсные возбудители). Осцилляторы применяют также для облегчения возбуждения дуги. Сварку неплавящимся электродом можно выполнять без присадки, когда шов формируется путем расплавления свариваемых кромок, и с присадкой, когда в формировании шва участвует присадочный металл, подаваемый со стороны в зону дуги.

Дуговую сварку в среде защитных газов неплавящимся электродом можно выполнять вручную, полуавтоматом или автоматом. При ручной сварке перемещение горелки и подачу присадочной проволоки в зону дуги выполняет сварщик. При полуавтоматической сварке перемещение горелки вдоль шва осуществляется вручную, а подача присадочной проволоки – специальным

механизмом. При автоматической сварке перемещение горелки и подача присадочной проволоки осуществляются механически.

Сварка неплавящимся электродом алюминия и его сплавов применяется преимущественно для соединения изделий малых и средних толщин.

Дуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом в среде защитных газов является наиболее универсальным способом сварки. Этим способом можно выполнять сварку в различных пространственных положениях и в труднодоступных местах. Формирование шва наилучшее. При сварке алюминия вольфрамовым электродом можно получить металл шва плотным, мало насыщенным газами. При этом достигается высокая прочность и пластичность сварных соединений, близкие к прочности и пластичности основного металла.

Сварку неплавящимся электродом в среде защитных газов рекомендуется применять для ответственных соединений, требующих высокого качества, герметичности и прочности.

Дуговую сварку в среде защитных газов плавящимся электродом можно выполнять с помощью полуавтоматов и автоматов. Полуавтоматическая и автоматическая сварка плавящимся электродом в защитных газах осуществляется на постоянном токе обратной полярности. Источники питания сварочной дуги должны иметь жесткую, полого возрастающую или полого падающую внешнюю характеристику. Сварку плавящимся электродом алюминия и его сплавов применяют для соединения изделий средних и больших толщин (3 и более мм). Основными преимуществами механизированной сварки плавящимся электродом являются высокая производительность и простота ведения процесса.

При сварке плавящимся электродом в среде защитных газов благодаря высокой степени концентрации источника тепла обеспечивают наименьшие сварочные деформации, а также более глубокое проплавление основного металла по сравнению со сваркой неплавящимся электродом. Плавящийся электрод позволяет получить хорошее проплавление корня шва при сварке тавровых и нахлесточных соединений.

При импульсно-дуговой сварке обеспечивается струйный перенос металла в широком диапазоне режимов сварки. Управление переносом электродного металла позволяет выполнять сварку плавящимся электродом во всех пространственных положениях без разбрызгивания с хорошим формированием сварного шва. При этом универсальность полуавтоматической сварки плавящимся электродом приближается к универсальности ручной дуговой сварки неплавящимся электродом. Импульсно-дуговой сваркой можно успешно сваривать детали небольшой толщины. При сварке импульсной дугой по сравнению со сваркой стационарной дугой значительно уменьшается пористость металла шва, возрастает прочность сварных соединений.

На сварных соединениях небольших размеров целесообразно проводить зачистку кромок шабером непосредственно перед сваркой. Помимо зачистки

стыка, необходимо удалять оксидную пленку шабером или стальной проволочной щеткой в месте токоподвода.

Режимы сварки, применяемые при сварке в аргоне неплавящимся электродом, приведены в таблице 11.3.

Таблица 11.3 – Автоматическая сварка неплавящимся электродом (защита Ar)

Толщина материала в мм	Сварочный ток в А	Диаметр в мм		Скорость сварки, м/ч	Расход защитного газа, л/минAr
		электрода	присадочной проволоки		
1	40-60	1,5-2	1,6	12	5-6
2	80-100	2-3	2	10	6-8
3	140-160	4	2	8	10-12

При сварке плавящимся электродом для проволоки диаметром 1,2 мм рекомендуемыми параметрами режима сварки стыковых соединений без разделки кромок являются: сварочный ток  $I_{св} = 120 - 150$  А; скорость сварки  $V_{св} = 32 - 36$  м/час; скорость подачи проволоки  $V_{п} = 280 - 320$  м/час; напряжение на дуге  $U_{д} = 19 - 21$  В; удельный расход аргона  $q_{г} = 6 - 8$  л/мин.

#### 11.4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

По заданию преподавателя осуществляется пробная сварка по одному из дуговых способов, изложенных в методических указаниях с соответствующей настройкой сварочной аппаратуры, делаются выводы о полученном качестве сварного соединения и эффективности применения технологии в конкретно взятых условиях.

Давыдов Александр Константинович

ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ СОВРЕМЕННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ

Методические указания  
к выполнению лабораторных работ  
по программе магистратуры 15.04.01 «Машиностроение»,  
направленности «Технология, оборудование и компьютерный инжиниринг  
автоматизированного машиностроения»

Редактор Н. Н. Погребняк

---

Подписано в печать 21.01.19	Формат 60x84 1/16	Бумага 65 г/м <sup>2</sup>
Печать цифровая	Усл. печ.л 4,0	Уч.-изд.л.4,0
Заказ 19	Тираж 25	Не для продажи

---

БИЦ Курганского государственного университета.  
640020, г. Курган, ул. Советская, 63/4.  
Курганский государственный университет.