МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В. О. Харламов

С. В. Хаустов

# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В СВАРКЕ

*Учебно-методическое пособие*

Волгоград

2016

УДК 621.791 (075)

*Р е ц е н з е н т ы:*
директор ДИЦ «Мост»
канд. техн. наук *В. М. Букин*;
директор ЗАО «Волгоградский завод
сварочных материалов ХОБЭКС»,
канд. техн. наук *В. А. Пронин*

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

**Харламов, В. О.**

Физические основы и тепловые процессы в сварке : учеб.-метод. пособие по дисциплинам «Физические основы сварки», «Тепловые процессы в сварке» / В. О. Харламов, С. В. Хаустов ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. 80 с.

ISBN 978-5-9948-2262-3

Представлен теоретический материал, не вошедший в курс лекций по дисциплинам «Физические основы сварки» и «Тепловые процессы в сварке», изложен порядок выполнения лабораторных работ по указанным дисциплинам.

Предназначено для студентов, обучающихся в рамках подготовки бакалавров по направлению 15.03.01 «Машиностроение», профиль «Оборудование и технология сварочного производства».

Ил. 23. Табл. 12. Библиогр.: 10 назв.

ISBN 978-5-9948-2262-3

© Волгоградский государственный
технический университет, 2016

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1
# ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ СУЩЕСТВОВАНИЯ ДУГИ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментально исследовать строение и свойства электрической сварочной дуги, горящей на постоянном токе; овладеть методикой снятия электрических характеристик сварочной дуги.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

2.1 Ознакомиться с оборудованием, применяемым при проведении лабораторной работы.

2.2. Последовательно провести каждый эксперимент с определением необходимых для построения экспериментальных зависимостей величин:

- расчетного тока,
- рабочего напряжения,
- полярности,
- длины дуги,
- расположения и размеров на экране анодного и катодного пятен, а также разрывной длины дуги.

2.3. Провести расчет значения падения напряжения на сварочной дуге для каждого эксперимента.

2.4. Построить графики статической характеристики дуги и статической вольтамперной характеристики сварочной дуги.

2.5. Составить отчет с приведением полученных данных, графиков и выводов по работе.

## 3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Электрическая сварочная дуга представляет собой устойчивый электрический разряд в газах.

Дугу по краям ограничивают два электрода (катод и анод), внутри которых ток протекает в виде направленного потока электронов. В газовом промежутке (столбе дуги) ток состоит из двух противоположно направленных потоков – потока электронов (от катода к аноду) и потока положительно заряженных ионов (направленного к катоду).

Электроны при выходе из катода в газовый промежуток преодолевают потенциальный барьер, затрачивая на это энергию φ, называемую *работой выхода*. Эта работа определяется свойствами материала катода (см. таблицу 1).

**Таблица 1**

**Работа выхода $\varphi_0$ для некоторых твердых тел и потенциал ионизации *U* «вырыва» первого электрона из изолированного (в газообразном виде) атома**

| Материал | *Cs* | *Fe* | | *W* | *H* | $O_2$ | *N* | *Ar* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Чист. | Окисл. | | | | | |
| Работа выхода | 1,93 | 4,74 | 3,92 | 5,52 | - | - | - | - |
| Потенциал ионизации | 3,9 | 7,83 | - | 8,0 | 13,53 | 13,56 | 14,5 | 15,7 |

Сравнение приведенных в таблице данных приводит к выводу, что «вырвать» электрон из изолированного (в парообразном состоянии) атома тяжелее, чем из металла. Можно полагать, что в металлах электроны расположены на более высоких орбиталях, т.е. уже частично «возбуждены». Тем не менее, существование потенциального барьера требует повышения энергетического уровня электронов (в количестве, равном работе выхода φ).

При сварке последнее достигается кратковременным шунтированием межэлектронного промежутка. При сварке плавящимся электродом

шунтирование осуществляется коротким замыканием и последующим размыканием токоведущих электродов, а при сварке угольным электродом дуговой промежуток шунтируют, как правило, третьим, вспомогательным электродом. При этом отдельные участки поверхности электродов под действием проходящего тока разогреваются до высокой температуры и после размыкания разогретые места продолжают эмитировать электроны в количестве, определяемым формулой Ричардсона-Дешмана:

$$j = AT^2 \exp(-\frac{\varphi}{kT}), \qquad (1)$$

где $j$ – плотность термоэмиссионного тока;

$\varphi$ – работа выхода;

$\kappa$ – постоянная Планка;

$T$ – абсолютная температура эмитирующего участка;

$A$ – постоянная ($\approx 1{,}2$ А/мм$^2 \cdot K$).

Разогрев плавящегося электрода при коротком замыкании сопровождается расплавлением металла и при отводе электродов от изделия жидкая перемычка растягивается, ее сечение уменьшается, а плотность тока и, соответственно, температура металла увеличиваются. В результате перемычка взрывается, способствуя ионизации газового промежутка, чем облегчается процесс возбуждения дуги.

Рассмотренный механизм может присутствовать и при размыкании контакта угольных электродов – за счет термоэлектронной эмиссии.

Второй способ увеличения доли «вырываемых» с поверхности электродов – снижение потенциального барьера наложением на электроды высокочастотного вспомогательного разряда от осциллятора (2300-2500 В, 250-300 кГц). Этот способ используется при сварке неплавящимся вольфрамовым электродом в среде защитных газов, когда шунтирование

электродов затруднительно или вовсе невозможно. После возбуждения дуги вспомогательный разряд становиться ненужным и его отключают.

Эмиссия электронов, обусловленная повышением температуры (первый способ возбуждения дуги), называется термоэлектронной эмиссия электронов, обусловленная действием электрического поля, называется автоэлектронной (или электростатической). Кроме того известны: фотоэлектронная эмиссия – выбивание электронов с поверхности электрода световым излучением; вторичная – возникающая при бомбардировке поверхности электрода тяжелыми частицами (атомами, ионами) или потоками первичных электронов. В сварочных дугах превалируют термо- и автоэлектронные эмиссии.

Электроны, покинувшие поверхность катода, под действием электрического поля с ускорением перемещаются к аноду через газовый промежуток. При этом они периодически сталкиваются с молекулами газа и, если скорость электронов достаточна, то происходит ионизация молекул газа с образованием положительно заряженного иона и дополнительного электрона (как правило, одного).

Ионизации способствует и высокая температура столба дуги. Ионизированный газ носит название плазмы, характерной особенностью которой является ее электропроводность (в отличие от плазмы, нейтральные газы и пары металлов – типичные изоляторы и ток не проводят). Сварочные дуги по виду плазмы могут быть отнесены к категории дуг термического типа, так как термоизоляция газа является механизмом образования плазмы. Степень ионизации ($X$) определяют из уравнения Саха:

$$\frac{X^2}{1-X^2} = 2{,}4 \cdot 10^{-4}(p^{-1})a^2 T^{\frac{5}{2}} \exp\left(\frac{-eUi}{kT}\right), \qquad (2)$$

где $p$ – давление газа;

$U_i$ – потенциал ионизации первого электрона в атоме (см. табл. 1);

$e$ – заряд электрона;

$\alpha^2$ - квантовый коэффициент;

$K$ и $T$ расшифрованы в (1).

Графики зависимости степени ионизации $X$ от $T$ имеют $S$-образный вид, причем ионизация большинства паров металлов свыше 90% достигается при $T \approx$ 10-12 тыс. градусов ($K$). Газы ионизируются на 90% и выше при $T \approx 20000$ $K$ (для гелия $X \approx 1$ при $T \geq 50000$ $K$).

Следует заметить, что уравнение Саха имеет хорошую сходимость с экспериментом только при малых значениях $X$, а при больших - вычисления значительно отличаются от наблюдаемых на практике.

Электроны (и первичные, и образовавшиеся при ионизации газа), подлетая к аноду, большей частью внедряются в него. Некоторые из них отражаются от поверхности анода и возвращаются обратно в столб дуги, однако под действием притяжения анода быстро теряют свою скорость, останавливаются и снова устремляются к аноду.

В результате этого процесса над анодом накапливается избыточное количество электронов, создающее анодное падение потенциала (по некоторым данным оно составляет 2-3 $B$, по другим 6-8 $B$). Расстояние, на котором наблюдается этот эффект, очень невелико ($10^{-3}$ - $10^{-4}$ см) вследствие чего напряженность электрического поля очень высока (2 - 8 $10^3$ $B$/см).

В прикатодной области наблюдается аналогическая картина, здесь образуется облако ионов. Однако от катода отражаются практически все ионы, поэтому прикатодное падение напряжения значительно больше, чем прианодное (10-20 $B$), протяженность этой области меньше ($10^{-7}$ - $10^{-5}$ см) из-за большой массы ионов и малой скорости их движения. Тем не менее, создаваемая ионным облаком напряженность электрического поля $E$ ($10^6$–

$10^8$ *В*/см) очень велика, что приводит к резкому ускорению свободных электронов, а также дополнительному снижению потенциального барьера (эффект Шоттки):

$$\varphi = \varphi_0 - e^{\frac{3}{2}} \cdot E^{\frac{1}{2}}, \tag{3}$$

где $\varphi_0$ – работа выхода при отсутствии электрического поля.

После подстановки в (3) значения заряда электрона получим:

$$\varphi = \varphi_0 - 3.8 \cdot 10^{-4} \cdot E^{\frac{1}{2}}, \tag{4}$$

В соответствии с изложенным падение напряжения на дуге $U_д$ может быть представлено тремя составляющими (рис. 1): падение напряжения в прикатодной области $U_к$, падение напряжения на столбе дуги $U_с$ и падение напряжения в прианодной области $U_а$:

$$U_{д} = U_к + U_с + U_а, \tag{5}$$

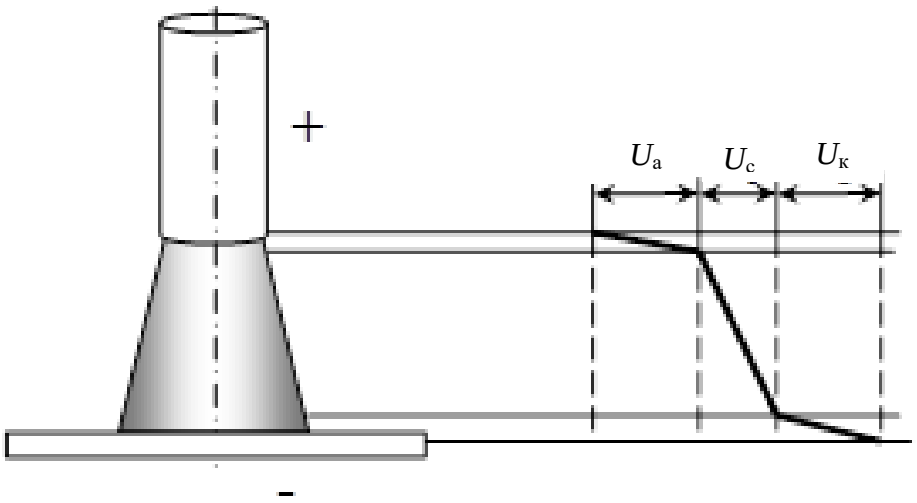



**Рис. 1. Распределение падения напряжения на дуге**

Падение напряжения в прианодной и прикатодной областях ($U_а$ + $U_к$) для данных условии горения дуги ($I$=*const*, постоянство материалов электрода и изделия) есть величина постоянная, не зависящая от длины дуги, а падение напряжения на столбе дуги $U_с$ будет практически пропорционально длине, так как при постоянстве всех остальных параметров степень ионизации $X$ и диаметр столба $d_с$ постоянны и от длины дуги не зависят. Тогда можно записать:

$$U_д = a + bl_д\,, \qquad (6)$$

где: $a = U_а + U_к$;

$b = E_с$ ($В$/см) – напряженность электрического поля в столе дуги.

Зависимость (6) при постоянстве тока носит название остатической характеристики сварочной дуги и имеет линейный вид (рис. 2).

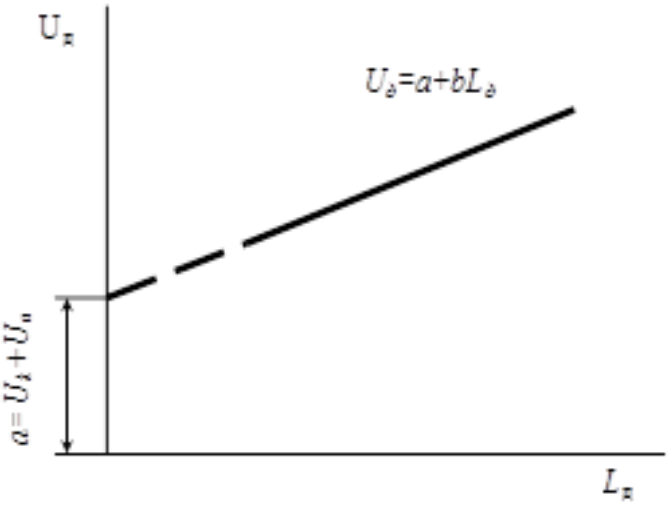



**Рис. 2. Остатическая вольт-амперная характеристика дуги ($I_д$=*const*)**

Если же длину дуги не изменять, а постепенно увеличивать ток с помощью балластного реостата, то изменение напряжения на дуге $U_д$ имеет более сложный вид (рис. 3).

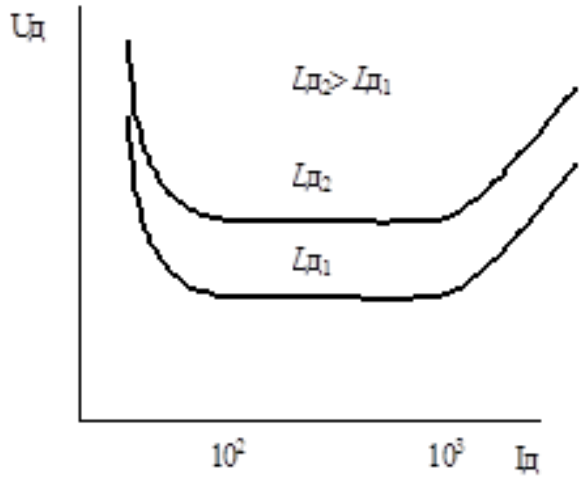



**Рис. 3. Статическая вольт-амперная характеристика дуги ($l_д$=*const*)**

При малых значениях тока (~ 10 - 100 А) наблюдается падение напряжения по мере увеличения тока; при средних значениях токов (100 - 1000 А) напряжение не зависит от величины тока и, наконец, при больших токах (свыше 1000 А) напряжение растет с увеличением тока. Такая зависимость объясняется следующими причинами.

При малых значениях тока дуга имеет низкую температуру, малый диаметр и низкую степень ионизации газа. Увеличение тока приводит и к резкому возрастанию степени ионизации, и росту диаметра столба дуги (вследствие роста катодного пятна), и повышению температуры в столбе из-за увеличения количества носителей тока. Все это приводит к многократному снижению сопротивления, причем интенсивность падения сопротивления значительно выше, чем интенсивность увеличения тока. Поэтому разность потенциалов на дуге падает.

Однако, по мере увеличения тока, степень ионизации постепенно стабилизируется и увеличение проводимости дуги определяется только ростом поперечного сечения столба, а оно увеличивается пропорционально

току. Таким образом, наступает момент, когда увеличение тока компенсируется снижением сопротивления столба дуги, вследствие чего напряжение на дуге остается постоянным.

При больших токах (800-1000 А и более) не только степень ионизации стабилизируется, но и поперечное сечение дуги не изменяется. Это происходит, во-первых, из-за того, что катодное пятно уже занимает всю площадь торца электрода и больше не увеличивается в размерах и, во-вторых, столб дуги сжимается вследствие *пинч - эффекта*. Поэтому с увеличением тока сопротивление столба увеличивается, что и сопровождается увеличением напряжения при росте силы тока.

Рассмотренные особенности прохождения тока в сварочной дуге сопровождается мощным тепловыделением. В общем, это тепловыделение подчиняется закону Джоуля - Ленца:

$$q_д = U_д \cdot I \cdot t\,, \qquad (7)$$

где $q_д$ – количество выделившегося на дуге тепла;

$t$ – время прохождения тока (время горения дуги).

Общим для всех участков сварочной дуги механизмом выделения тепла является торможение электронов: внутри они тормозятся на ионах кристаллической решетки; при переходе через поверхность катода, электроны, преодолевая потенциальный барьер, также тормозятся; в столбе дуги электроны сталкиваются с молекулами газа и изменяют свою скорость; при вхождении в анод электроны также уменьшают скорость своего движения.

Кроме этого механизма можно назвать: переход свободных электронов на орбитали кристаллической решетки анода (выделяется энергия, численно равная работе выхода); присоединение электрона к иону в столбе дуги (деионизация) – выделяется энергия, численно равная

потенциалу ионизации; ионы, двигаются к катоду, при соударении с ним раскачивают атомы кристаллической решетки; также разогревают анод и электроны, отскакивающие от анода.

Помимо механизмов тепловыделения в сварочной дуге есть механизмы теплозатрат. Так при переходе электрона с поверхности катода его потенциальная энергия увеличивается на величину работы выхода $\varphi$. Кроме этого, в столбе дуги происходит ионизация молекул газа, что также требует затрат энергии.

Несмотря на такое сложное переплетение механизмов тепловыделения и теплозатрат, первые преобладают над вторым, поэтому электрическая сварочная дуга является источником мощного тепловыделения (7). По интенсивности тепловыделения ($10^4$-$10^6$ Вт/см$^2$) сварочные дуги уступают только электронному и лазерному лучам.

Температура столба дуги очень велика и связана с эффективным потенциалом ионизации газа, так как дуга горит, как правило, в смеси газов и паров металла, то энергия, затрачиваемая на ионизацию, определяется «эффективным» потенциалом:

$$U_0 = -\frac{T}{5800}\ln\sum_1^k (Y_i)^{\frac{1}{2}}\exp(-\frac{5800U_i}{T}), \qquad (8)$$

где $k$ – количество входящих в смесь составляющих;

$Y_i$ – концентрация $i$–го компонента смеси;

$U_i$ – потенциал ионизации $i$–го компонента.

Для ручной дуговой сварки температура столба дуги оценивается по формуле:

$$T_{cm} \approx 800\ U_0 \qquad (9)$$

Для сварки вольфрамовым электродом:

$$T_{\text{cm}} \approx 1000\ U_0 \tag{10}$$

Для сварки плавящимся электродом под флюсом:

$$T_{\text{cm}} \approx 1100\ U_0 \tag{11}$$

По длине столба температура принимается постоянной, однако для тугоплавких катодов (уголь, вольфрам) это не совсем справедливо.

Температура катода принимается равной температуре кипения $T_{\text{к}} \approx T_{\text{кип}}$, вследствие чего встречается понятие «холодных» катодов (из плавящихся металлов – железа, меди и т.д.) и «горячих» (из неплавящихся материалов) катодов. Температура холодных катодов – 3000 $K$ и ниже, температура горячих катодов – 5000 $K$ и выше.

Несмотря на то, что температура анода также достигает $T_{\text{кип}}$, однако, тепла здесь выделяется больше, чем на катоде. Во-первых, электроны при выходе из катода увеличивают свою потенциальную энергию на величину работы выхода φ. Кроме того, они имеют некоторую начальную скорость движения, т.е. уносят с собой кинетическую энергию. Количество этой энергии по одним источникам равно $\frac{3}{2}kT_{\text{к}}$, по другим $2kT_{\text{к}}$. Таким образом, мощность тепловыделения на катоде:

$$q_к = IU_k - I(\varphi + 2kT_{\text{к}}). \tag{12}$$

На аноде при внедрении электронов их кинетическая энергия $2kT$ переходит в тепло и, одновременно, в виде тепла высвобождается работа выхода, поэтому:

$$q_{\text{а}} = IU_a + I(\varphi + 2kT). \tag{13}$$

Разница в тепловыделении на аноде и катоде проявляется в разной скорости их плавления, что легко зафиксировать, поддерживая дугу между двумя одинаковыми плавящимися электродами.

## 4. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

**Описание лабораторной установки и используемые материалы.**

Лабораторная установка включает в себя:

- сварочный источник постоянного тока,
- балластный реостат,
- амперметр,
- вольтметр,
- переключатель полярности,
- установку для визуального изучения строения сварочной дуги, состоящую из линзы и экрана,
- угольный стержень с изоляционной ручкой для зажигания дуги, измерительный инструмент: линейка, штангенциркуль.

Используемые материалы:

- угольные или графитовые электроды,
- угольные и металлические (стальные, медные) пластины размером 100×100 (6…10) мм.

## 5. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

### 5.1. Изучение строения сварочной дуги и определение разрывной длины дуги $L_р$ на прямой и обратной полярностях.

Зажечь дугу между графитовым электродом и графитовой пластиной на прямой полярности и установить сварочный ток $I_д$=120…150А.

Спроектировать дугу на экран, добиваясь ее четкого изображения и срисовать контуры на чистый лист бумаги.

Увеличивая длину дуги до обрыва, отметить на рисунке ее начальную и разрывную $L_р$ длину.

По измеренному диаметру электрода на рисунке к его действительному диаметру определить масштаб увеличения проекционного изображения. Вычислить истинные размеры начальной и разрывной длины дуги.

Опыт повторить на обратной полярности и другом материале пластины.

Полученные результаты опытов пункта 5.1 занести в табл. 2.

**Таблица 2**

**Результаты замеров разрывной длины дуги**

| № | Диаметр электрода, мм | Масштаб увеличения | Материал электродов | | Разрывная длина дуги, мм | | Диаметр активных пятен, мм | | Ток дуги, А | Полярность |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | катод | анод | на экране | истинная | катодного | анодного | | |
| 1 | | | | | | | | | | |
| … | | | | | | | | | | |

## 5.2. Снятие статической вольт-амперной характеристики дуги $U_д=f(I_д)$, $l_д=const$, горящей между графитовыми электродом и пластиной на постоянном токе прямой полярности.

Установить длину дугового промежутка $l_д$ = 3…4 мм. Пользуясь балластным реостатом, установить начальный сварочный ток $I_д$ = 60 А, возбудить дугу и измерить по приборам ток и напряжение на дуге – $I_д$ и $U_д$.

Повторить опыт, увеличивая на балластном реостате ток каждый раз на 30А (до 210…240А). Перед каждым опытом длину дугового промежутка установить равной $l_д$ . Увеличить длину $l_д$ до 5…6 мм и снять вольт-амперную характеристику как в предыдущих опытах. Результаты измерений силы тока и напряжения на дуге занести в табл. 3.

**Таблица 3**

**Результаты экспериментов по определению ВАХ дуги**

| Длина дуги $l_д$, мм | Ток дуги, $I_д$, А | Напряжение дуги, $U_д$, В | Полярность | Примечание |
|---|---|---|---|---|
| $l_1$= | | | | |
| $l_2$= | | | | |
| $l_{кз}$= | | | | |

Дополнительно к этим экспериментам необходимо измерить напряжение и ток при коротком замыкании (последняя строка таблицы 3).

### 5.3. Снятие зависимостей длины дуги от напряжения

Используя балластный реостат, установить величину тока при минимально возможной ее длине ($l_д$ = 2 мм ). Электрод и пластина графитовые, полярность – прямая. Измерить по приборам величины тока дуги $I_д$ и напряжения $U_д$. Выключить ток, измерить длину дугового промежутка. Повторить опыты 4…5 раз, увеличивая каждый раз длину промежутка на 1 мм. Результаты измерений $I_д$, $U_д$, $l_д$ оформить в виде табл. 4.

**Таблица 4**

**Результаты экспериментов для построения характеристики дуги**

| Материал | | Полярность | Длина дуги, $l$ мм | Напряжение на дуге, $U_д$, В | Вычисленные значения коэффициентов | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| анод | катод | | | | $a$, В | $b$, В/мм |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

По опытным данным (таблица 4) построить характеристику дуги $U_д=f(I_д)$. Пользуясь графиком статической характеристики дуги, определить численные значения коэффициентов «*a*» и «*b*» и записать полученные значения в уравнение остатической характеристики дуги:

$$U_{\partial} = U_k + U_a + U_{cm} = a + bl$$

где $a = U_k + U_a$;

$$b = \frac{U_{cm}}{l}.$$

Проанализировать полученные данные и сделать выводы.

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Привести краткие сведения по теории изучаемого явления.
2. Кратко описать эксперименты с приложением таблиц опытных данных, построенными и рассчитанными величинами.
3. Привести основные выводы по работе.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое электрическая сварочная дуга?
2. Какие существуют основные способы возбуждения сварочных дуг?
3. Что такое "холодный" и "горячий" катоды?
4. Какие способы ионизации характерны для сварочных дуг?
5. С помощью каких механизмов интенсифицируют процесс эмитирования электронов с поверхности катода?
6. Какие механизмы тепловыделения осуществляются на катоде?
7. Какие механизмы тепловыделения осуществляются на аноде?

8. Какие механизмы тепловыделения осуществляются в столбе дуги?
9. Какие механизмы теплозатрат характерны для катода?
10. Какие механизмы теплозатрат характерны для столба дуги?
11. Какие механизмы теплозатрат характерны для анода?
12. Что такое статическая вольтамперная характеристика сварочной дуги?
13. Что такое остатическая характеристика сварочной дуги?
14. Что такое "работа выхода" электронов?
15. Что такое потенциал ионизации?
16. Что такое "эффективный" потенциал ионизации?
17. Чем вызвано падение напряжения в дуге при малых силах тока (СВАХ)?
18. Чем вызвано постоянство напряжения в СВАХ при средних силах тока?

    Чем вызвано увеличение напряжения в СВАХ при больших силах тока?
19. Почему при постоянной силе тока изменение напряжения происходит пропорционально длине дуги?

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2
# ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ СУЩЕСТВОВАНИЯ ДУГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Овладеть методикой измерения и регистрации электрических параметров дуги и исследовать влияние теплофизических свойств материала электрода и свариваемого объекта на характеристики дуги, горящей на переменном токе.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

2.1 Изучить способы измерения и регистрации быстроизменяющихся электрических величин, характеризующих горение дуги на переменном токе.

2.2 Произвести запись кривых изменения тока и напряжения в процессе горения дуги на переменном токе между электродами из различных материалов.

2.3 По экспериментальным кривым определить зависимость электрических характеристик дуги от теплофизических свойств материала электродов и полярности дуги.

2.4 Дать рекомендации по повышению устойчивости горения дуги на переменном токе.

## 3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Дуга переменного тока отличается от дуги постоянного тока периодической сменой полярности катода и анода. Так, в случае питания дуги от источника переменного тока с частотой 50 Гц полярность дуги

будет меняться 100 раз секунду. В период смены полярности и угасания дуги дуговой газ частично деионизируется вследствие снижения температуры и изменения направления движения заряженных частиц. Понижение температуры уменьшает эмиссию электронов с катода. В случае значительной деионизации дугового газа и уменьшения эмиссии электронов последующее возбуждение дуги происходит при напряжении более высоком, чем это требуется для ее горения в установившемся режиме. Увеличенное напряжение в момент возбуждения дуги называют пиком зажигания (рисунок 1).

Установлено, что величина пика зажигания определяется теплофизическими свойствами, $T$ плавления, $T$ испарения материала катода, расположением катода на электроде или основном металле, составом дугового газа, работой выхода и др.

Так, если материал катода обладает высокой теплопроводностью, или катод расположен на основном металле, где теплоотвод происходит интенсивнее, пик зажигания становится выше.

Обычно на тугоплавких электродах дуга горит без четко выраженного катодного пятна. На плавящихся электродах, как правило, образуется катодное пятно с высокой температурой на поверхности и большой плотностью тока эмиссии. Однако, температура поверхности катодного пятна не может быть выше $T_{кип}$ материала катода, и поэтому сила тока у многих материалов значительно уступает величине максимальной температуры, которая может быть достигнута на поверхности таких тугоплавких металлов как вольфрам и углерод (табл. 1).

При длительном рассмотрении осциллограмм тока и напряжения можно заметить, что кривые напряжения устойчивого горения дуги несимметричны относительно нейтральной оси. Это различие становится особенно заметным в случае применения электродов и изделий из

различных материалов, когда к неодинаковым условиям эмиссии электронов с электрода и изделия добавляются различия в работе выхода, теплофизических свойствах и др.

**Таблица 1**

**Теплофизические свойства некоторых материалов**

| Материал | Температура, ºС | | Теплопроводность Вт/(м·к) | Работа, эВ | |
|---|---|---|---|---|---|
| | плавления | кипения | | ионизации | выхода |
| C | - | 4830 | 12,5 | 11,2 | 4,39 |
| Fe | 1539 | 2887 | 77,9 | 7,83 | 4,36 |
| Cu | 1089 | 1280 | 41,3 | 7,7 | 4,47 |
| Al | 660 | 2348 | 208,1 | 5,95 | 3,74 |
| W | 3377 | 5372 | 112,6 | 8,1 | 4,50 |

Так, по измерениям Т.И.Лескова (рис. 1) коэффициенты α и $b$ в уравнении:

$$U_д = \alpha + bL \qquad (1)$$

для дугового разряда между электродами графит-сталь равны:

графит – сталь прямая полярность α = 13,2-13,6 В; $b$=2,1…2,3В/мм;

сталь – графит обратная полярность α = 18,0-18,6 В; $b$=2,3…2,5В/мм.

Следовательно, принимая длину дуги равной 5 мм, получим для случая графит – сталь $U_д$ = 24,4 В и графит – графит $U_д$ = 30,3 В.

Например, при горении дуги между электродами вольфрам – алюминий в те периоды, когда катодом является вольфрам, дуговой разряд начинается почти без пика зажигания, благодаря высокой температуре кипения и относительно низкой теплопроводности вольфрама. В те полупериоды, когда катодом является алюминий, возбуждение дуги происходит со значительным пиком зажигания. В этом примере

наблюдается и значительная ассиметрия осциллограммы напряжения относительно нейтральной оси (рис. 2). Все это на практике осложняет сварку алюминия вольфрамовым электродом.

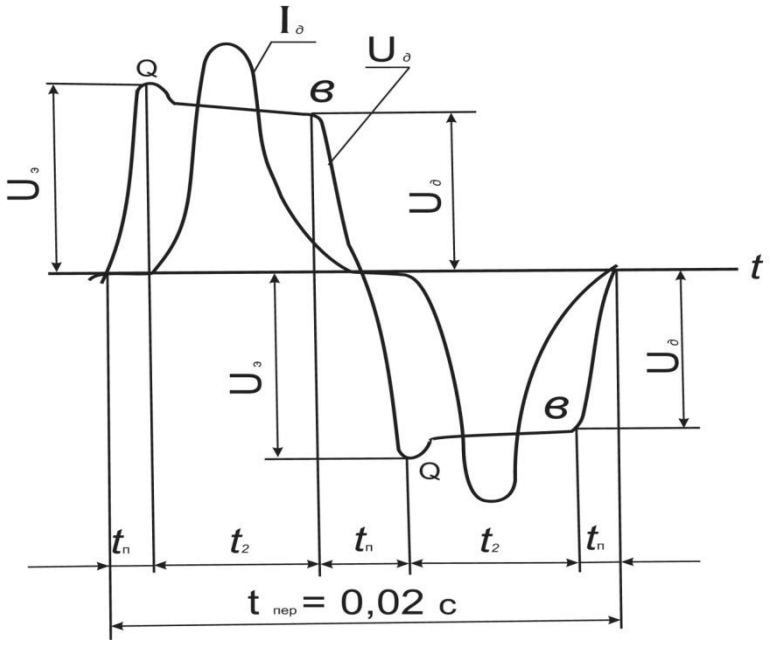



**Рис. 1. Кривые изменения тока и напряжения дуги во времени при сварке переменным током**

$I_д$ –ток дуги; $U_д$ – напряжение дуги; Q –тепло пик зажигания; $t_2$ – время горения дуги; $t_п$ – время паузы.

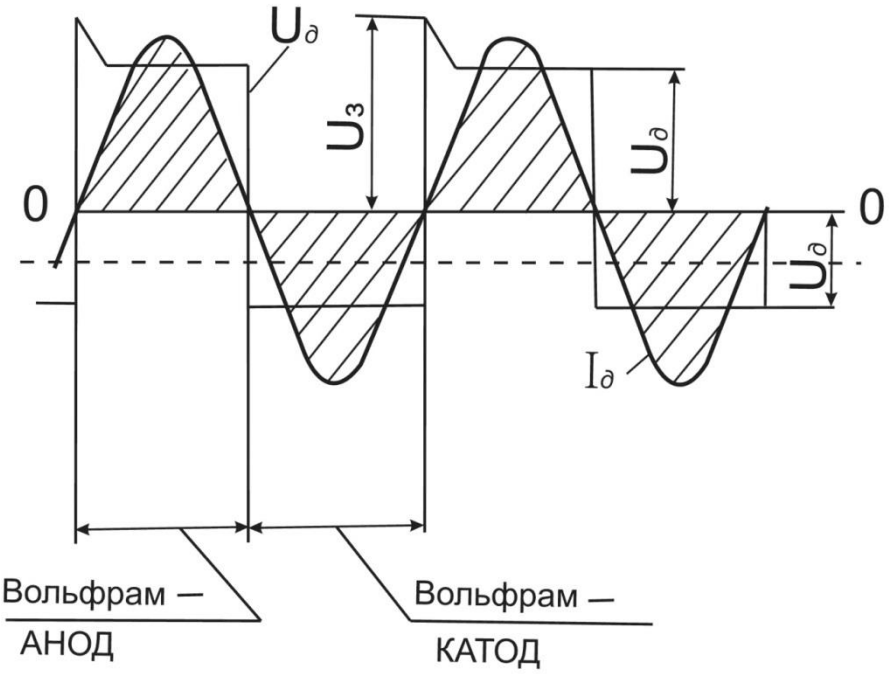



**Рис. 2. Изменение кривых тока и напряжения при горении дуги переменного тока между электродами с различными теплофизическими свойствами (вольфрам-алюминий)**

# 4. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ И МАТЕРИАЛЫ

1) Сварочный пост переменного тока.

2) Осциллограф запоминающий С8-9А.

3)Угольные электроды.

4)Пластины: стальная, алюминиевая (сплав АМг6), графитовая.

Схема поста предоставлена на рис. 3.

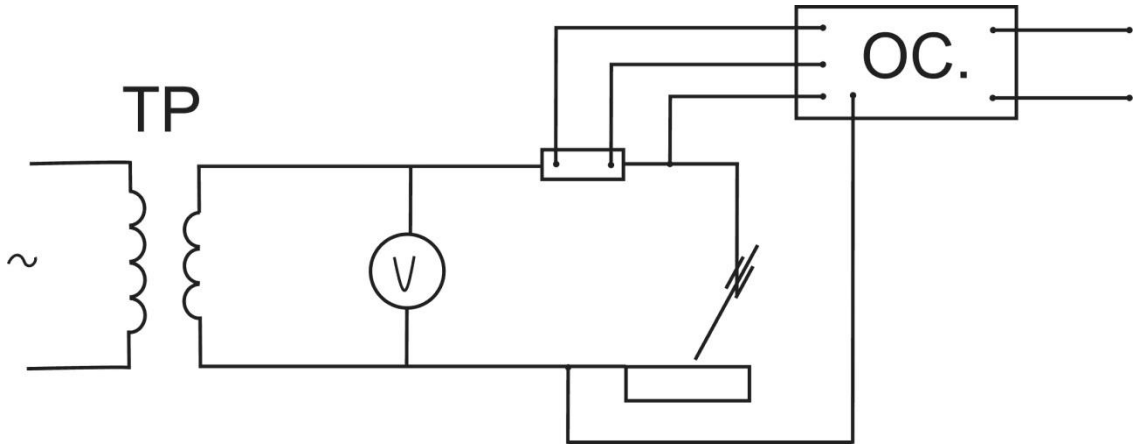



**Рис. 3. Схема поста для снятия осциллограмм тока и напряжения переменного тока.** ТР- трансформатор, ОС- осциллограф.

# 5. ОСЦИЛЛОГРАФ ЗАПОМИНАЮЩИЙ СВ-9А

## 5.1. Назначение

Осциллограф запоминающий СВ-9А предназначен для исследования однократных и периодических импульсных сигналов путем запоминания изображения с экрана электроннолучевой трубки. Максимальная скорость записи не менее 100 км/с, полоса пропускания усилителя вертикального отклонения от постоянного тока до 2,5 мГц.

## 5.2 Устройство электроннолучевой трубки (ЭЛТ) и принцип работы прибора

Схема устройства ЭЛТ и соединения электродов с наружными выводами представлена на рис. 4, наименования электродов приведены в таблице 2.

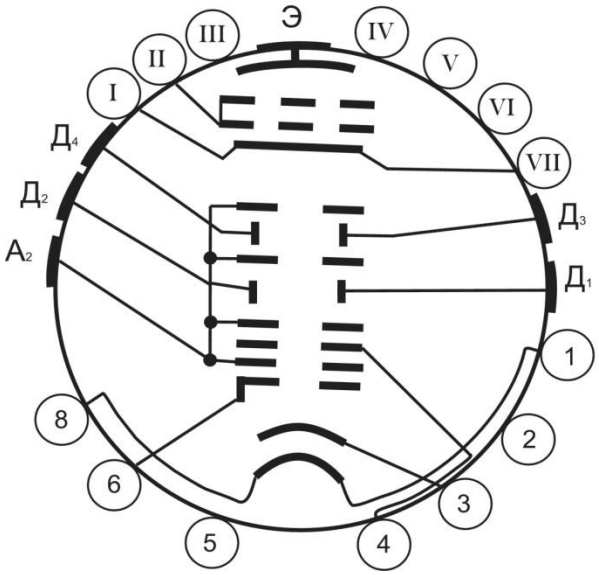



**Рис. 4. Схема соединения электродов ЭЛТ**

**Таблица 2**

**Наименование электродов ЭЛТ**

| Номер выводов | Наименование электродов |
|---|---|
| 1, 7 | Подогреватель |
| 2, 5 | Свободный электрод |
| 3 | Катод пишущего прожектора |
| 4 | Анод I (фокусирующий) |
| 6 | Модулятор |
| $A_2$ | Анод II |
| $Д_1$ , $Д_2$ | Нижние (сигнальные) отклоняющие пластины |
| $Д_3$ , $Д_4$ | Верхние (временные) отклоняющие пластины |
| I, VII | Катод воспроизводящего прожектора |
| II | Блок мишени |
| III, V | Технологический вывод |
| IV, VI | Свободный электрод |

С трубки прибора обеспечивается максимальная скорость записи не ниже 100 км/с. За минимальную скорость записи принимается максимальная линейная скорость перемещения луча по экрану ЭЛТ, при которой в режиме запоминания обеспечивается регистрация однократных сигналов. Скорость записи может быть определена путем регистрации синусоидального сигнала и вычисляется по формуле:

$$V = A2\pi f, \qquad (2)$$

где $V$ – скорость записи в км/с;

$A$ - половина полного изображения в мм (полный размер равен рабочей части шкалы 40 мм);

$f$ - частота сигнала МГц.

Формула справедлива при записи на экране не менее 3-5 периодов.

Так, при скорости записи 100 км/с должна обеспечиваться регистрация синусоидального сигнала частотой 0,8 МГц при размере изображения 40 мм.

Запоминающая трубка с видимым изображением имеет два прожектора: запоминающий и воспроизводящий. Кроме двух прожекторов имеются элементы памяти: мишень и коллектор.

Покрытый люминофором экран служит для воспроизведения формы регистрирующих сигналов.

Процесс преобразования электрических сигналов, подаваемых на отклоняющие пластины, в видимое изображение на экране ЭЛТ и сохранение изображения в течение длительного времени происходит следующим образом. Перед записью сигнала на мишень подается стирающий импульс, повышающий ее потенциал и делающий ее как бы прозрачной, для медленных электронов воспроизводящего прожектора и

весь экран трубки светится. По прекращению подачи на мишень стирающего импульса потенциал мишени снижается, сквозь нее медленные электроны не проходят, экран перестает светиться. Мишень подготовлена к новой записи. Записывающий луч, проходя по мишени, повышает ее потенциал. В тех местах, где прошел записывающий луч, мишень делается прозрачной для медленных электронов воспроизводящего луча. Происходит воспроизведение изображения соответствующее по форме полученному на мишени потенциальному рельефу записывающим лучом.

### 5.3. Подготовка прибора к работе

Прибор присоединяется к сети шнуром питания. При этом тумблер "Сеть" выключен (рисунок 5).

Корпус прибора обязательно заземляется. До включения прибора в сеть органы управления лучом устанавливаются в следующее положения:

- ручка "яркость" в левое крайнее положение;
- ручка "яркость" воспроизведения в среднее положение;
- тумблер "запись" (под верхней крышкой прибора) выключен.

### 5.4. Меры безопасности

1) При эксплуатации, ремонте, настройке прибора следует помнить о наличии высокого напряжения до 450 В для питания схемы и напряжений до 3 кВ для питания ЭЛТ;
2) Корпус прибора всегда должен быть заземленным.(Клемму ⊥ соединить с линией заземления).
3) Работа прибора со снятыми ручками и стенками запрещается.

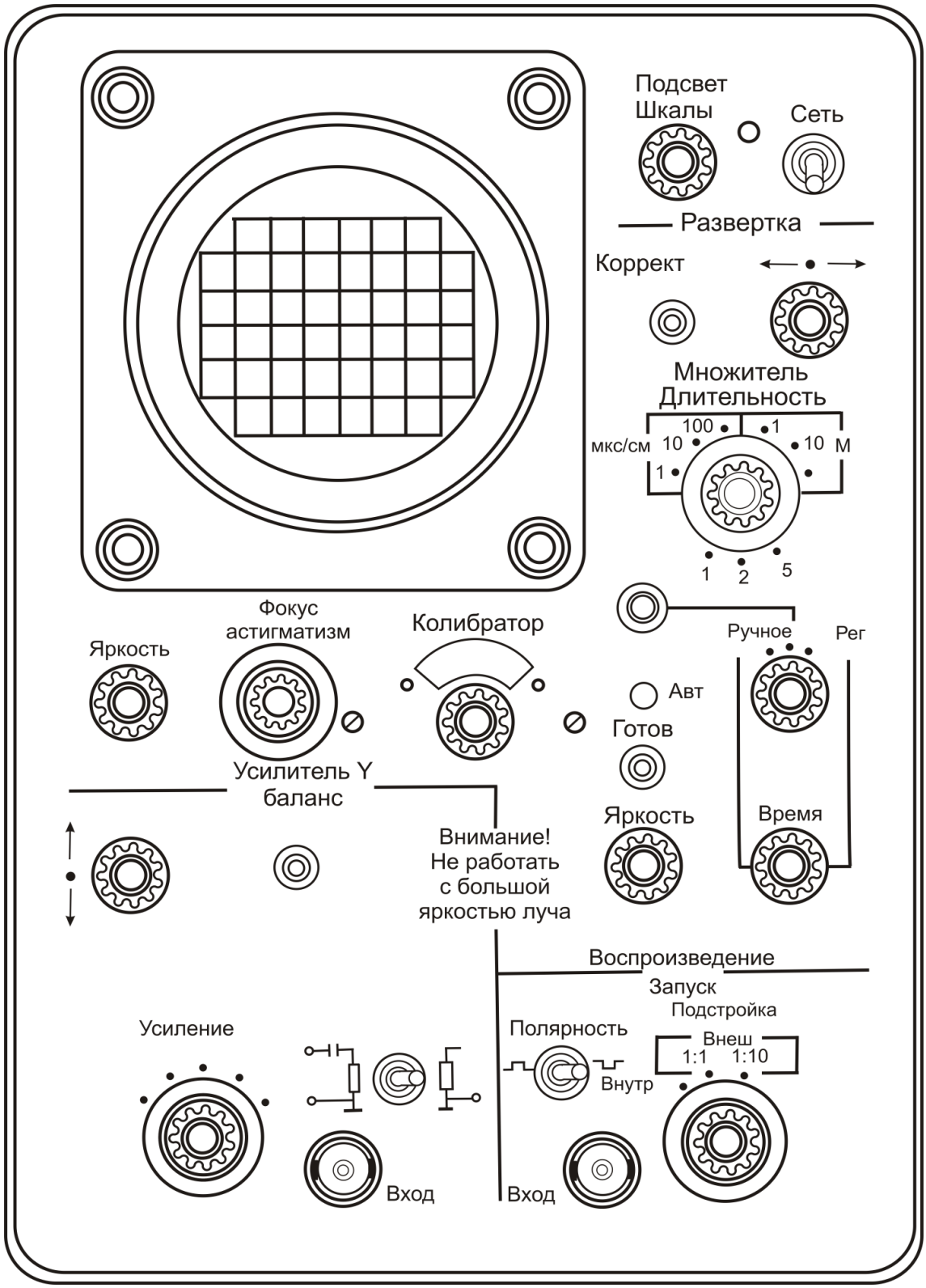



**Рис. 5. Передняя панель осциллографа. Расположение органов управления**

4) Ремонтные и регламентные работы должны осуществляться с соблюдением правил техники безопасности при работе с радиоизмерительными приборами.

### 5.5. Порядок работы

Подготовку прибора к измерениям рекомендуется проводить в режиме регулируемого стирания, при котором допускается запуск развертки в следующем режиме.

До включения прибора в сеть органы управления устанавливаются следующим образом:

- "фокус", "астигматизм" - в среднее положение;
- "время" воспроизведения - в среднее положение.

Органы управления усилителем и разверткой устанавливаются в положение:

- "смещение" ↕ в среднее положение;
- "смещение" ↔ в левое крайнее или близкое к нему;
- "длительность" - в положение I мкс/дел х 2;
- ручка "стирание" - в положение "стирание/рег" (развертка в ждущем режиме);
- ручка "запуск развертки" - в положение "внутрь" полярность в соответствии с поданным сигналом;
- ручка "усиление" - в крайнем правом положении, а входной делитель - "1:10". Вход открытый.

Тумблером "сеть" включается прибор. О включении прибора сигнализирует лампочка.

Включается тумблер "запись" и через 15 мин. После включения можно приступить к оперированию органами управления прибором.

Ручка "яркость" вводится в правое положение, а вращением ручки "подстройка" запускается развертка до появления изображения импульса на экране.

Органами управления лучом устанавливается оптимальная яркость и фокусировка луча. Яркость луча устанавливается такой, чтобы изображение хорошо наблюдалось на небольшом фоне экрана. Фон устанавливается ручкой "яркость" воспроизведения. При вращении ручки "время" по часовой стрелке яркость возрастает, послесвечение увеличивается и в крайнем правом положении достигает почти полной памяти. Стирание следа производится переводом ручки "время" воспроизведения в положение минимального послесвечения – крайнее левое положение.

В положении переключателя хода работы "ручн." трубка переводится в режим запоминания, развертка – в однократный режим с блокировкой от повторного запуска.

При восстановленной развертке горит неоновая лампа кнопки "готов", осциллограф подготовлен к однократной записи. При подаче сигнала на вход осуществляется запись. При этом, если необходимо, следует подобрать ток пишущего прожектора ручкой "яркость". При нажатии кнопки "стирание" экран трубки должен ярко засветиться, при опускании – погаснуть. При восстановлении развертки прибор вновь готов к записи.

В положение "авт." переключателя рода работ трубка и развертка работают в тех же режимах, что и при стирании. При наличии сигналов на входе включается в работу автомат, производящий автоматическое стирание подготовку к записи.

Ручка "время" воспроизведения при этом определяет продолжительность воспроизведения записанного сигнала от момента

записи до момента стирания. В левом положении ручки "время" воспроизведение минимально, а в правом максимальное около 1 мин.

Осциллограф имеет внутреннее калибрационное напряжение для измерения амплитуд исследуемых сигналов. Калибратор амплитуды выдает калиброванное напряжение значением от 0,1 до 1 В. Это напряжение при установке входного делителя в положение "калибр" подается на вход усилителя, минуя входной делитель. Выставляя это напряжение размахом, равным размаху исследуемого сигнала, можно определить амплитуду последнего путем считывания со шкалы калибратора, установленного калибрационного напряжения, умноженного на коэффициент деления входного делителя.

Ручку усиления вертикального тракта (усилители вертикального отклонения) при измерении не сдвигать с положения, которое было при осциллографировании. Если амплитуда исследуемого сигнала превышает 1 В, необходимо пользоваться выносным делителем (с соответствующим кабелем 1:10 или 1:100). Усилитель имеет открытый и закрытый входы. Открытый вход предназначен для исследования процессов, содержащих постоянную составляющую или низкие частоты. При подаче на вход усилителя исследуемого сигнала с постоянной составляющей изображение на экране трубки сместиться на величину этой составляющей, которая может быть измерена. Закрытый вход предназначен для исследования электрических процессов, не содержащих в своем спектре низких частот меньше 500 Гц, а также для отделения постоянной составляющей.

*Пример измерения напряжения (амплитуды).* При достижении размаха изображения, полученного от исследуемого калибрационного сигнала, равного размаху исследуемого сигнала, получили значение по шкале калибратора равное 320 МВ. Делитель установлен в положение 1:10, выносной делитель 1:100. Амплитуда исследуемого сигнала равна:

$$320 \cdot 10 \cdot 100 : 1000 = 320 \text{ В}.$$

*Пример измерения длительности сигнала.* Измеренная длительность одного периода сигнала холостого хода равна 4 делениям шкалы ЭЛТ. Множитель длительности установлен в положение 1 м/с х 5.

Длительность одного периода сигнала равна:

$$4 \cdot 0{,}001 \cdot 5 = 0{,}02 \text{ с}.$$

## 6. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

6.1. Подготовить сварочный пост и осциллограф к работе.

6.2. Включить источник питания, записать напряжение холостого хода и измерить его; установить масштаб времени по длине волны напряжения.

6.3. Снять на кальку с экрана ЭЛТ записанную кривую, нанести на график оси координат и обозначить на них масштаб измеряемых величин.

6.4. Возбудить дугу между графитовым электродом и графитовой пластиной и записать кривую изменения напряжения.

6.5. снять с экрана ЭЛТ на кальку записанную кривую напряжения – нанести на график оси координат и, используя установленный масштаб по осям координат на графике холостого хода, нанести масштаб напряжения и времени на оси координат. Измерить на графике величину пика зажигания $U_з$ и величины напряжения горения дуги в каждом периоде. По разности найденных значений напряжения устойчивого горения дуги определить величину ассиметрии напряжения на осциллограмме.

6.6. Проделать такие же опыты для дуги, горящей между графитовым электродом и стальной пластиной, графитовым электродом и алюминиевой пластиной.

## 7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Теоретические основы горения дуги на переменном токе;
2. Схема поста, принцип устройства, записи и измерения электрических сигналов с помощью запоминающего осциллографа с8-9а;
3. Осциллограммы напряжения, обработанные в соответствии с рабочим заданием;
4. Выводы по работе, включая объяснение характерных особенностей графиков напряжения и их различий для исследованных материалов.

## 8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоят особенности горения сварочной дуги на переменном токе?
2. Что такое повторное возбуждение дуги и какие условия для этого необходимы?
3. Какие изменения в условиях существования дугового разряда приводят к появлению пика зажигания?
4. Чем объясняется отличие по величине $U_з$ для различных электродов?
5. Какой принцип положен в основу записи сигналов на ЭЛТ запоминающего осциллографа?
6. Как с помощью запоминающего осциллографа измерить амплитуду и длительность регистрируемого импульса?

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3
# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРОЧНОЙ ДУГИ

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение и овладения методикой экспериментального определения эффективной тепловой мощности при сварке плавящимся и неплавящимся электродами.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Изучить теоретическую часть и методику проведения работы.
2. Ознакомиться с оборудованием, применяемым при проведении лабораторной работы.
3. Произвести наплавку валика с последующим калориметрированием образцов.
4. Записать в таблицу экспериментальные значения рабочего тока, напряжения, времени сварки, времени переноса образца в калориметр и др.
5. Определить эффективный КПД при сварке плавлением плавящимся и неплавящимся электродами.
6. Составить отчет и сделать выводы о проделанной работе.

## 3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 3.1. Основы теплового баланса сварочной дуги

Теплота, выделяемая сварочным источником нагрева, предназначена для расплавления металла изделия и присадочного металла с целью

соединения между собой свариваемых поверхностей. Только некоторая часть энергии, затраченной при сварке, вводится в металл, что связано с потерями теплоты на испарение металла, нагрев шлака или защитного газа и др.

Эффективной тепловой мощностью называется количество теплоты, вводимой сварочным источником тепла в металл за единицу времени.

Полная тепловая мощность, выделяемая источником тепла при сварке плавлением с помощью электрической дуги, условно можно определить по закону Джоуля-Ленца:

$$q_д = IU_д, \quad (Дж/с), \tag{1}$$

где $I$, $U_д$ – соответственно, ток и напряжение на дуге.

При горении дуги на электродах видны яркосветящиеся активные пятна – катодное и анодное. Центральная часть дуги, расположенная между катодной и анодной областями, носит название столба дуги. Принципиальная схема распределения падения напряжения в дуге показано на рис.1.

Согласно данной схеме, в дуге наблюдаются ясно выраженные области падения напряжения, локализованного в приэлектродных областях, и линейное падение напряжения в столбе. По сравнению с общей длиной дуги (расстояние между электродами) линейные размеры приэлектродных областей невелики. Так, размер прикатодной области около $10^{-5}$ см, несколько больше размер прианодной области.

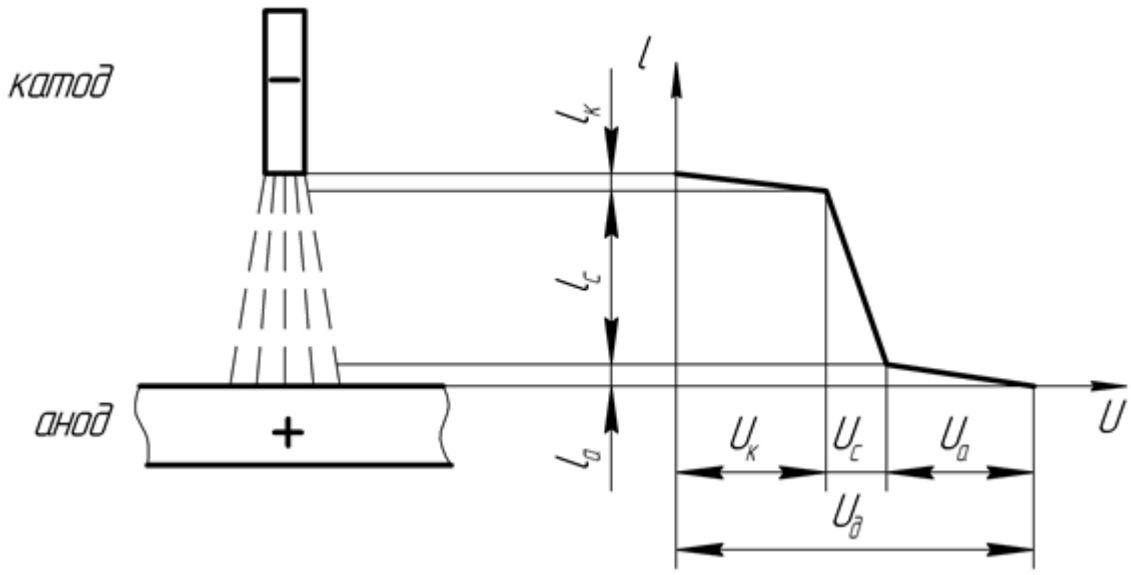



**Рис. 1. Принципиальная схема распределения падения напряжения $U_д$ в дуге.**

Согласно данной схеме, в дуге наблюдаются ясно выраженные области падения напряжения, локализованного в приэлектродных областях, и линейное падение напряжения в столбе. По сравнению с общей длиной дуги (расстояние между электродами) линейные размеры приэлектродных областей невелики. Так, размер прикатодной области около $10^{-5}$ см, несколько больше размер прианодной области.

Упрощенно можно считать, что общее падение напряжение в дуге $U_д$ определяется тремя составляющими: падение напряжения на катоде $U_к$, падение напряжения на аноде $U_а$ и падение напряжения на столбе дуги $U_с$:

$$U_д = U_к + U_а + U_с. \qquad (2)$$

Рассмотрим из чего складывается приход и расход энергии в приэлектродных областях и в столбе дуги.

Энергия катоду сообщается бомбардирующими его ионами. Однако часть всей тепловой энергии катода уходит, т.е. расходуется на потенциальную энергию, которая уносится электронами в столб дуги

(работа их выхода из металла) и кинетическую энергию, соответствующую температуре $T$ плазмы столба.

В общем случае теплота (энергия), выделяющаяся в катодной области, расходуется на эмиссию электронов, на нагревание, плавление и испарение материала катода, а также на тепловое излучение (радиацию).

Тогда уравнение баланса энергии на катоде будет иметь вид:

$$q_к = IU_к - (\varphi + 2kT)I, \qquad (3)$$

где $IU_к$ - полная энергия прихода на катод;

$\varphi$ - работа выхода (эмиссии) электронов из металла катода;

$2kT$ - кинетическая энергия электронов.

Энергия аноду сообщается электронами. Ее составляющими являются: кинетическая энергия электронов $IU_к$, получивших ускорение при прохождении через анодную область (т.к. в прианодной области энергия переносится только электронами); энергия работы выхода $\varphi$, совершаемая при вхождении электронов в анод; кинетическая энергия электронов $2kT$.

В общем случае теплота (энергия), выделяющаяся в анодной области, расходуется на нагревание, плавление и испарение материала анода, а также на тепловое излучение (радиацию).

Тогда уравнение баланса энергии на аноде будет иметь вид:

$$q_a = IU_a - (\varphi + 2kT)I, \qquad (4)$$

Энергетическая мощность, выделяющаяся на столбе дуги $(q_с = IU_c)$, в первом приближении не воздействует на анод и катод, хотя, несомненно,

часть этой энергии им передается, например, излучением, действующим во все стороны. Однако этот приток энергии компенсируется струями паров, выбрасываемыми из приэлектродных областей в столб дуги и окружающее пространство.

Таким образом, при сварке неплавящимся электродом полезной мощностью является $q_а$, а $q_к$ и $q_с$ ( при прямой полярности) не участвуют в нагреве металла. Эффективность сварочного источника тепла (процесса нагрева изделия дугой) характеризуется  ффективным КПД  источника нагрева $\eta_и$, представляющего собой отношение эффективной тепловой мощности дуги $q_и$ к полной мощности дуги $q_д$  (которая определяется методом калориметрирования). Тогда эффективный КПД источника нагрева при сварке неплавящимся электродом $\eta'_и$ равен:

$$\eta'_и = \frac{q_а}{q_д} = \frac{U_а + (\varphi + 2kT)}{U_д} \qquad (5)$$

При сварке плавящимся электродом тепловая мощность, идущая на нагрев катода $q_к$, попадает в свариваемый металл вместе с каплями расплавленного металла, поэтому эффективность этого способа сварки выше, чем при сварке неплавящимся электродом:

$$\eta''_и = \frac{q_к + q_а}{q_д} = \frac{U_к + U_а}{U_д} \; . \qquad (6)$$

Очевидно, формулы (5) и (6), очень приблизительны, т. к. не учитывают многих  условий технологии процесса.

Доля теряемого бесполезного тепла зависит от способа сварки: при сварке под флюсом она составляет 5–20%, при ручной дуговой сварке

плавящимися электродами в зависимости от качества обмазки, ее состава и т.п. доля потерь может достичь 25–35%, а при сварке неплавящимся электро-дом эффективная тепловая мощность еще меньше и доля потерь может достигать 50%.

При сварке плавящимся электродом эффективная тепловая мощность мало зависит от рода тока, полярности и величины сварочного тока, но понижается при значительном возрастании плотности тока в электродах. При ручной сварке плавящимся и неплавящимся электродами эффективная тепловая мощность уменьшается с увеличением длины сварочной дуги и повышается с ее заглублением в сварочную ванну за счет соответственного увеличения или уменьшения потерь на теплообмен с окружающей средой.

## 3.2 Методика экспериментального определения эффективной тепловой мощности электрической сварочной дуги

Из-за неопределенности величины составляющих потерь энергии при сварке, расчетное определение эффективной мощности дает существенную погрешность результата. Поэтому ее определяют условно с помощью эффективного КПД:

$$q_u = \eta_u q_д , \qquad (7)$$

где $\eta_и$ – эффективный КПД источника нагрева (сварки плавлением), характеризующий долю тепла сварочного источника теплоты, вводимую в основной металл.

Ориентировочная величина эффективного КПД для различных условий сварки в настоящее время известна по многочисленным опытным оценкам эффективной мощности. Классическим способом определения

эффективной тепловой мощности сварочного источника считается ее определение калориметрическим методом.

Этот метод заключается в том, что на заранее приготовленный образец на определенном режиме наплавляется валик плавящимся электродом, после чего образец опускают в калориметр (рис. 2) – специальное устройство, позволяющее определить теплосодержание опускаемого в калориметр образца.

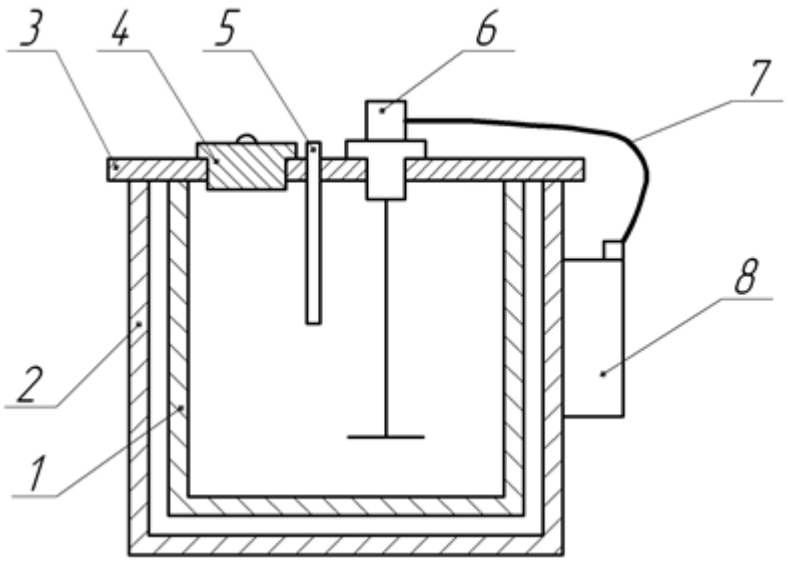



**Рис. 2. Принципиальная схема устройства калориметра**
1 – внутренняя стенка; 2 – наружная ; 3 – верхняя часть; 4 – крышка; 5 – термометр; 6 – электродвигатель смесителя; 7 – соединительный провод; 8 – блок управления.

Как правило, это сосуд изготавливается с двойными или тройными стенками, внутри которого налита вода или другая жидкость с определенной теплоемкостью (находящийся между стенками сосуда воздух значительно снижает теплообмен воды с окружающей средой). В калориметре с тройными стенками между наружной и средней также наливается вода, температура которой равна температуре воды в калориметре, что еще больше снижает теплообмен с окружающей средой.

Выражение для подсчета эффективной тепловой мощности электрической сварочной дуги выводится из уравнения теплового баланса:

$$Q = q_u \tau = Q_к + Q_\Delta + Q_п + Q_T, \qquad (8)$$

где: $t_г$ – время горения дуги (сварки), [$c$];

$Q$ – теплота, введенная в образец источником нагрева за время горения дуги, [Дж] или [кал], *1* кал = *4,1868* Дж;

$Q_к$ – теплота, полученная калориметром от образца, [Дж];

$Q_\Delta$ – теплота, составляющая разницу в теплосодержании образца до и после опыта, [Дж];

$Q_п$ – теплота, расходуемая на парообразование при погружении образца в калориметр, [Дж];

$Q_т$ – теплота, теряемая в окружающую среду при нагреве и переносе образца вследствие теплообмена его с окружающей средой (конвекции и радиации), [Дж].

Теплота $Q_к$, полученная калориметром от образца, определяется по формуле:

$$Q_к = G_в c_в \left(T_к - T_н\right) + A\left(T_к - T_н\right), \qquad (9)$$

где $G_В$ – вес воды в калориметре, [кг];

$c_В$ – удельная теплоемкость воды, равная 4180 Дж / кг$\cdot$град;

$T_н$, $T_к$ – соответственно начальная и конечная температура воды в калориметре до и после опыта, [$^\circ C$];

$A$ – постоянная калориметра (в большинстве случаев определяется экспериментально для каждого калориметра), [Дж / град].

Теплота $Q_\Delta$ , составляющая разницу в теплосодержании образца до и после опыта (определяющая полный запас тепловой энергии внутреннего состояния образца) определяется по формуле:

$$Q_\Delta = G_{об} c_{об} \left( T_к - T_о \right), \tag{10}$$

где $G_{об}$ – вес образца после опыта, [кг];

$c_{об}$ – удельная теплоемкость образца (для малоуглеродистой стали составляет 520 [Дж / (кг• град)];

$T_о$ – температура образца до опыта, равная температуре окружающей среды, [$°C$ ].

При определении теплоты $Q_п$, расходуемой на парообразование, наибольшую трудность представляет определение веса испарившейся воды. Для упрощения расчета тепла, расходуемого на парообразование, можно воспользоваться таблицей 1.

**Таблица 1**

**Количества тепла, расходуемого на парообразование, в зависимости от сварочного тока**

| Сварочный ток, А | 100 | 200 | 400 | 600 | 1000 | 1500 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Теплота парообразования $Q_п$, кал | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1500 |

Потери теплоты на теплоотдачу в окружающую среду от образца определяются как функция от мгновенного теплосодержания его во время сварки:

$$Q'_T = bq_u \int_0^{t_г} t dt \,, \qquad (11)$$

где $b = \dfrac{2\alpha}{c\rho\delta}$ – коэффициент температуроотдачи, учитывающий теплоотдачу в окружающую среду через поверхности пластины (образца), [*1/°C*];

$\alpha$ – коэффициент полной поверхностной теплоотдачи образца (для малоуглеродистой стали $\alpha$ = 0,001 [кал / см$^2$ • с • град ]);

$c\rho$ – объемная теплоемкость металла образца (для малоуглеродистой стали $c\rho$ = *1,3* [кал / (см$^3$ • град)]) ;

$\delta$ – толщина образца, [см].

Потери тепла в окружающую среду происходят также и во время переноса образца от места сварки к калориметру. Их величину упрощенно можно определить по формуле:

$$Q''_T = bq_u t_г^2 t_n \,, \qquad (12)$$

где $t_п$ - время переноса образца в калориметр, [с].

После определения всех составляющих, эффективная тепловая мощность может быть определена из выражения:

$$q_u = \frac{Q_к + Q_\Delta + Q_n}{t_г - \dfrac{\alpha}{c\rho\delta}\left(t_г^2 + 2t_г t_n\right)}. \qquad (14)$$

Тогда эффективный КПД источника нагрева конкретного опыта (способа сварки) можно определить из выражения:

$$\eta_и = \frac{q_и}{q_д}. \quad (15)$$

Эффективный КПД показывает эффективность использования тепловой энергии дуги (источника нагрева) для различных способов сварки. Наибольшее значение эффективного КПД источника нагрева достигается при сварке под флюсом, где $\eta_и$ = 0,80-0,95 .

## 4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. До выполнения работы самостоятельно изучить теоретическую часть.
2. Работа выполняется на лабораторной установке, которая включает в себя:

- сварочный аппарат для ручной дуговой сварки плавящимся и неплавящимся электродами;
- сварочный стол;
- калориметр;
- весы;
- термометр;
- секундомер.

3. Эксперименты проводятся на образцах из малоуглеродистой стали размерами (6-10) х (40-60) х (150-200) мм.
4. Образец укладывается на рабочий стол таким образом, чтобы удобно

взять образец щипцами. Калориметр располагается как можно ближе к рабочему столу.

5. Провести без проплавления насквозь наплавку широкого валика по средней части образца вдоль его большой стороны, начиная и заканчивая на расстоянии 15…20 мм от его краев. Время сварки (наплавки) замерить секундомером с точностью до 0,1с и занести в табл.2.

**Таблица 2**

**Исходные данные**

| № опыта | Способ сварки | $I$ *А* | $U$ *В* | $t_г$ *с* | $t_п$ *с* | $T_н$ *°С* | $T_к$ *°С* | $T_о$ *°С* | $G_{об}$ *Кг* | $G_в$ *кг* | δ *см* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Неплавящимся электродом | | | | | | | | | | |
| 2 | Плавящимся Электродом | | | | | | | | | | |

6. Взять образец со стола щипцами и по возможности как можно быстро опустить его в калориметр. Время переноса фиксировать с точностью до 0,1 с.
7. Включить мешалку и перемешивать воду в течение 2–3 минут.
8. Через 2–3 минуты измерить температуру воды термометром с точностью до 0,02 – 0,05 °С. Значения исходной и конечной температуры записать в таблицу.
9. В процессе проведения опытов следить за величиной сварочного тока и напряжения, фиксируя их среднюю величину в таблице.
10. Провести расчет составляющих теплового баланса и эффективного КПД источника нагрева при сварке плавящимся и неплавящимся электродами. Полученные результаты занести в табл.3.

**Таблица 3**

**Расчетные данные**

| № опыта | Способ сварки | $Q_к$ **Дж** (кал) | $Q_Δ$ Дж (кал) | $Q_п$ **Дж** (кал) | $q_и$ **Дж/с** (кал/с) | $q_д$ Дж/с (кал/с) | $\eta_и$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Неплавящимся электродом | | | | | | |
| 2 | Плавящимся электродом | | | | | | |

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Рисунок схемы распределения перепада напряжения в дуге.
4. Формулы и результаты расчета составляющих теплового баланса и эффективного КПД источника нагрева при сварке плавящимся и неплавящимся электродами.
5. Исходные данные и окончательные результаты расчетов занести в таблицы 2 и 3.
6. Выводы о проделанной работе.

## 6. ПЕРЕЧЕНЬ КОНТРОЛЬНЫХ ВОПРОСОВ

1. Что называется эффективной тепловой мощностью источника?
2. Что такое полная тепловая мощность источника нагрева?
3. Из каких составляющих складывается падение напряжения в дуге?
4. Из чего складывается приход и расход энергии в прикатодной области?
5. Из чего складывается приход и расход энергии в прианодной области?

6. Чему равен эффективный КПД источника нагрева для различных способов сварки?
7. Почему эффективный КПД источника при сварке плавящимся электродом выше, чем при сварке неплавящимся электродом?
8. Для чего предназначен и как устроен калориметр?
9. Перечислите составляющие уравнения теплового баланса?
10. Какие температуры и времена необходимо знать для расчета составляющих теплового баланса?
11. Что такое коэффициент температуроотдачи?
12. Перечислите оборудование, приборы, инструменты и материалы, необходимые для выполнения данной лабораторной работы.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПРОПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА СВАРОЧНОЙ ДУГОЙ

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определение термического К.П.Д. при наплавке валика на массивное тело и изучение влияния параметров режима сварки на его величину.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

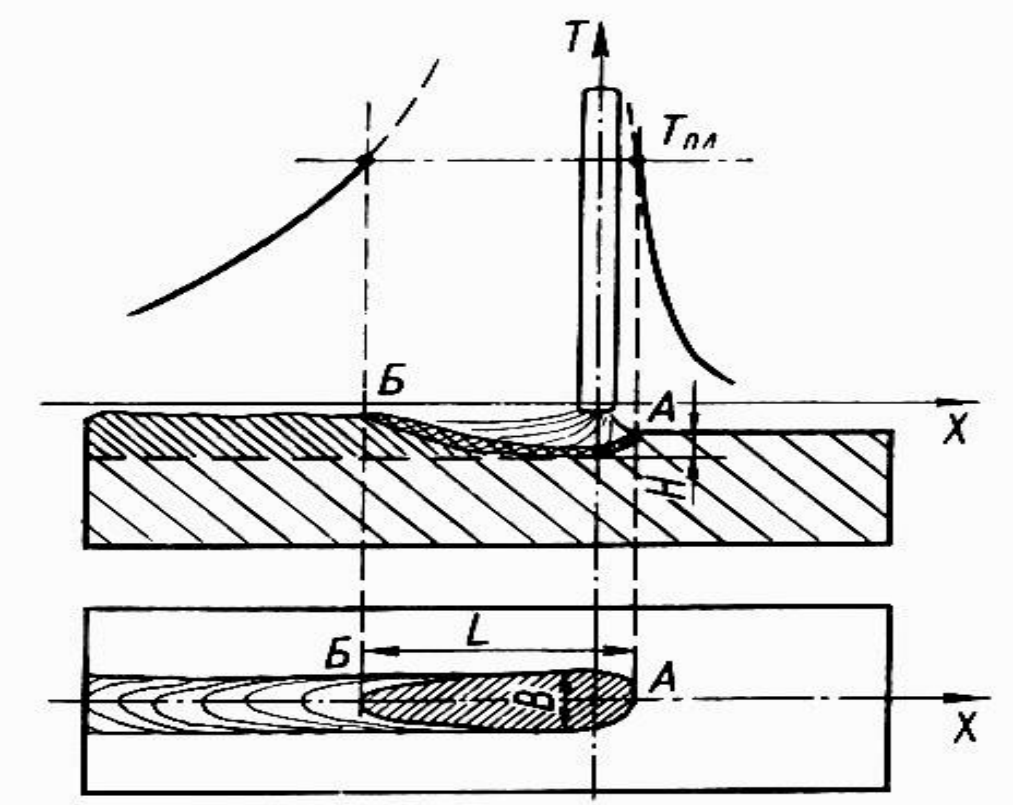
1. Изучить теоретическую часть работы.
2. Ознакомится с оборудованием, применяемым при проведении лабораторной работы.
3. Установить влияние величины сварочного тока на длину ванны при наплавке валика на массивное тело.
4. Определить термический К.П.Д. процесса проплавления расчетным и экспериментальным методами.
5. Установить влияние тока и скорости сварки на термический к.п.д. процесса проплавления.
6. Составить отчет и сделать выводы о проделанной работе.

## 3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

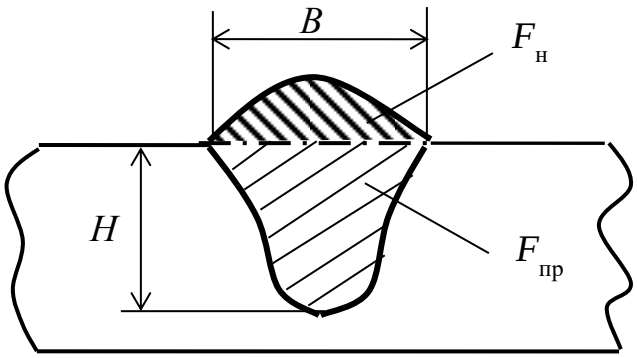
### 3.1 Определение длины сварочной ванны

В процессе горения и перемещения дуги под ней образуется жидкая сварочная ванна, которая представляет собой область металла, нагретую выше температуры плавления. Основной металл расплавляется в передней части ванны и отбрасывается к задней её части. По форме сварочной ванны можно судить о форме изотермической поверхности, соответствующей

температуре $T_{пл}$ основного металла. Очертания ванны на поверхности изделия также представляют собой изотерму $T_{пл}$ (Рис. 1а).




а)




б)

**Рис. 1. Основные параметры сварочной ванны (а) и параметры сечения зоны проплавления сварного шва (б).**

По форме ванны, образованной в нижнем положении, различают два основных вида сварочных дуг:

а) поверхностная дуга – кратер не глубокий, под пятном дуги значительный слой жидкого металла;

б) погруженная дуга – кратер глубокий, жидкий металл оттесняется к заднему концу ванны и форма проплавления изменяется.

Сварочная ванна характеризуется следующими параметрами (Рис. 1а):

*L* – длинна сварочной ванны;

*B* – ширина ванны;

*H* – глубина проплавления

Очертания зоны проплавления характеризуются следующими показателями (Рис. 1б):

*H/B* – относительная глубина проплавления;

$\psi_{пр} = \frac{B}{H}$ - коэффициент формы провара

$\mu_{пр} = \frac{F_{пр}}{HB}$ - коэффициент полноты проплавления

Для сварки под флюсом характерно большое значение *H/B*, которое обычно не превышает 3. Величина $\mu_{пр}$ колеблется в пределах 0,6…0,8.

Длинна сварочной ванны при наплавке валика на массивное тело рассчитывается по следующей формуле:

$$L = \frac{q_n}{2\pi\lambda T_{пл}}, \text{ [см]} \qquad (1)$$

где $q_n$ – эффективная тепловая мощность дуги, [Дж/с];

$\lambda$ – коэффициент теплопроводности металла, $[\frac{Дж}{см \cdot с \cdot град}]$;

$T_{пл}$ – температура плавления металла, [°С].

Значения теплофизических характеристик для различных металлов приведены в табл. 1.

**Таблица 1**

**Теплофизические характеристики для различных металлов и сплавов**

| Материал | Температура плавления, $T_{пл}$, $^0$C | Коэффициент теплопроводности, $\lambda$, $\frac{Дж}{см \cdot с \cdot град}$ | Коэффициент температуропроводности, а, см$^2$/с |
|---|---|---|---|
| Малоуглеродистая сталь | 1520 | 0,38…0,42 | 0,07…0,09 |
| Нержавеющая аустенитная сталь | 1520 | 0,25…0,33 | 0,05…0,07 |
| Медь | 1080 | 3,7…3,8 | 0,95…0,96 |
| Алюминий | 660 | 2,7 | 1,0 |

Эффективная тепловая мощность дуги определяется по следующим формулам:

$$q_n = \eta_n q = \eta_n IU \text{ , [Дж/с]} \quad (2)$$

$$q_n = 0{,}24\eta_n IU \text{ , [кал/с]} \quad (3)$$

где $q$ – тепловая мощность дуги, [Дж/с];

$\eta_n$ – эффективный к.п.д. процесса нагрева изделия дугой, характеризующий долю тепла сварочного источника теплоты, вводимую в основной металл;

$I$ – ток дуги, [А];

$U$ – напряжение дуги, [В]

Эффективный К.П.Д. процесса нагрева $\eta_n$ зависит от технологии сварки, длинны дуги, степени углубления её в металл и др. Эффективный К.П.Д. снижается при увеличении длинны дуги и растет по мере углубления дуги в металл. Опытные значения $\eta_n$ для различных методов сварки приведены в таблице 2.

**Таблица 2**

**Экспериментальные значения ηn для различных методов дуговой сварки**

| Способ сварки | $I_{св}$ , А | $U_д$ , В | $\eta_n$ , % |
|---|---|---|---|
| Дуга угольная открытая | 160-250 | 26-30 | 50-60 |
| Дуга в аргоне (вольфрамовый электрод) | 150-200 | 24-32 | 50-60 |
| Дуга открытая (стальной электрод) | 180-250 | 26-32 | 65-85 |
| Дуга в углекислом газе (стальной электрод) | 350-400 | 24-28 | 80-84 |
| Дуга открытая (порошковая проволока) | 370-450 | 25-28 | 80-86 |
| Дуга под флюсом | 600-800 | 28-34 | 80-96 |

## 3.2 Определение термического К.П.Д. процесса проплавления металла

Теплота, выделяемая сварочным источником нагрева, предназначена для расплавления металла изделия, а также присадочного металла, с целью соединения между собой свариваемых поверхностей. Однако количество теплоты участвующего непосредственно в расплавлении металла, сравнительно не велико, вследствие потерь тепла на испарение металла, нагрев шлака или защитного газа, подогрев металла не участвующего в расплавлении. Таким образом значительная часть тепла расходуется бесполезно, т.е. не выполняет своего прямого назначения – расплавлять металл.

Эффективность использования тепловой энергии сварочных источников теплоты характеризуется термическим К.П.Д. $\eta_T$ процесса проплавления основного металла:

$$\eta_T = \frac{V_{св} F_{пр} \rho \cdot S_{пл}}{q_n}, \qquad (4)$$

где $V_{св}$ – скорость сварки, [см/с];

$F_{пр}$ – площадь зоны проплавления, [см$^2$];

$\rho_{пл}$ – плотность металла, [г/см$^3$];

$S_{пл}$ – теплосодержание, [Дж/г], для малоуглеродистой стали $S_{пл}$=1360 Дж/г.

Для определения термического К.П.Д. процесса проплавления при сварке и наплавке дугами, движущимися с произвольной скоростью, пользуются номограммами (Рис. 2, 3). При наплавке валика на массивное тело $\eta_T$ находят по номограмме (Рис. 2) в зависимости от безразмерного критерия:

$$\varepsilon_2 = \frac{q_n}{a\delta S'_{пл}}, \qquad (5)$$

где $\delta$ – толщина листа, [см].

Номограммы учитывают уширение валика или углубление дуги, т.е. *H/B* – относительную глубину проплавления. На графике представлены кривые для различных отношений *H/B* в пределах 0,1 – 2,5, что в основном охватывает все случаи, встречающиеся на практике.

*Полный тепловой* К.П.Д. равен произведению эффективного и термического коэффициентов полезного действия:

$$\eta_П = \eta_n \eta_T \ , \qquad (6)$$

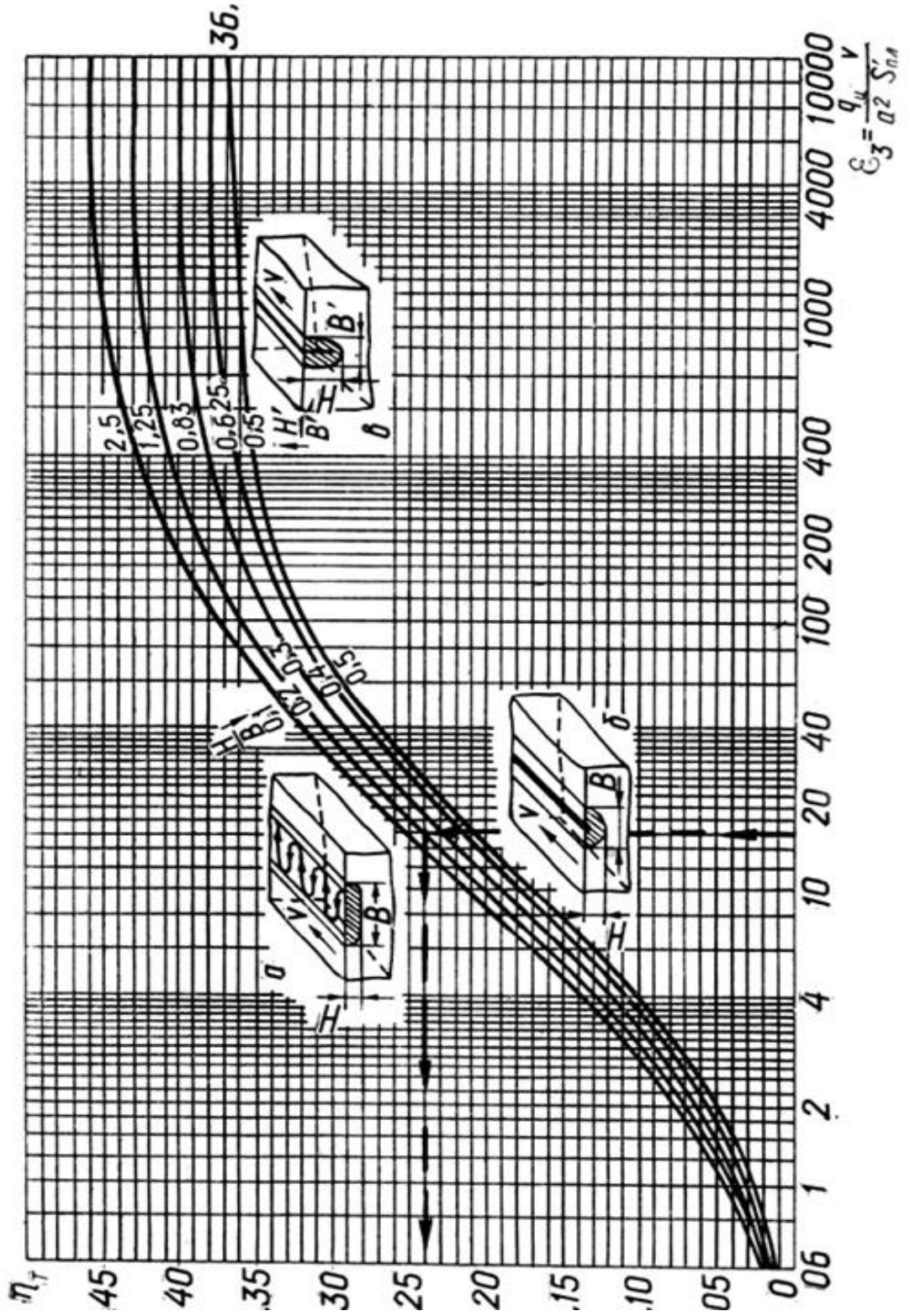



**Рис. 2 Номограмма для определения термического к.п.д. $\eta_T$ при наплавке валика на массивное тело H/B=0,1…2,5:**

а – уширенная зона, *H/B*<0,5; б – полукруглая зона, *H/B*=0,5;

в – углубленная зона, *H'/B'*>0,5

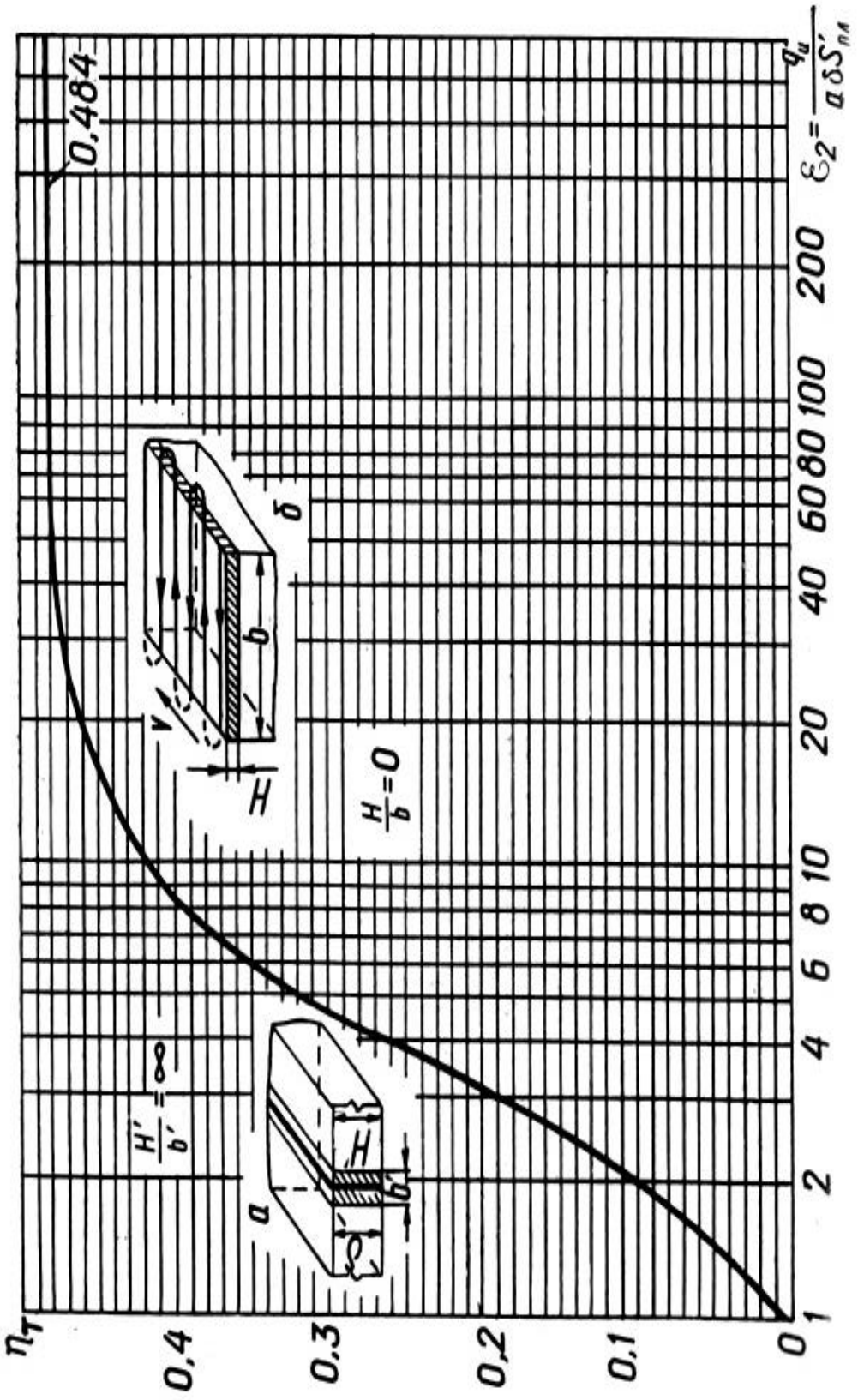



**Рис.3 Номограмма для определения термического к.п.д. $\eta_T$ :**

а – сварка тонких листов встык в один проход, *H'/B'*=∞;

б – наплавка широкого валика на массивное тело, H/B=0

Термический К.П.Д. процесса проплавления с увеличением мощности дуги (т.е. силы тока) и повышением скорости сварки при прочих равных условиях значительно увеличивается. Поэтому мощные быстродвижущиеся источники теплоты (например автоматическая сварка под флюсом) наиболее эффективны и характеризуются более развитой зоной проплавления. Маломощные медленно движущиеся источники теплоты не эффективны, т.к. в этом случае возрастает опасность непровара.

## 4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. До выполнения работы самостоятельно изучить теоретическую часть.
2. Для заданного преподавателем режима сварки рассчитать длину сварочной ванны.
3. По результатам расчетов построить графическую зависимость влияния величины сварочного тока на длину ванны.
4. Определить термический К.П.Д. процесса проплавления по заданному режиму сварки.
5. Определить термический К.П.Д. процесса проплавления по размерам зоны проплавления, замеренной на макрошлифе участка сварного шва.
6. Определить полный тепловой К.П.Д. процесса проплавления.
7. По результатам расчетов построить графические зависимости влияния сварочного тока и скорости сварки на термический к.п.д. процесса проплавления.

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Схема и результаты расчета длины сварочной ванны.
4. Графическая зависимость влияния величины сварочного тока на длину ванны.
5. Результаты расчета термического К.П.Д. процесса проплавления, определенные по двум методикам.
6. Результаты расчета полного теплового К.П.Д.
7. Графические зависимости влияния сварочного тока и скорости сварки на термический К.П.Д. процесса проплавления.
8. Выводы о проделанной работе.

## 6. ПЕРЕЧЕНЬ КОНТРОЛЬНЫХ ВОПРОСОВ

1. Что такое эффективная тепловая мощность источника теплоты?
2. Что такое эффективный К.П.Д. процесса сварки?
3. Что такое поверхностная сварочная дуга?
4. Что такое погруженная сварочная дуга?
5. Какими параметрами характеризуется сварочная ванна?
6. От чего зависит длина сварочной ванны?
7. Что такое термический К.П.Д. процесса проплавления?
8. Какие параметры влияют величину термического К.П.Д. процесса проплавления?
9. Что такое полный тепловой К.П.Д.?
10. От чего зависит относительная глубина проплавления шва?

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5
# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКЕ

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить и овладеть методикой экспериментального определения термических циклов в заданных точках при различных скоростях охлаждения металла.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Изучить теоретическую часть и методику проведения лабораторной работы.
2. Ознакомиться с оборудованием, применяемым при проведении данной работы.
3. Закрепить пластину с зачеканенной термопарой в приспособлении сварочного стола и подсоединить концы термопары к потенциометру.
4. Наложить валик на заданном расстоянии от термопары с измерением необходимых для расчета характеристик рабочего тока, рабочего напряжения, времени наложения валика.
5. Провести расчет термического цикла для рассматриваемого модельного источника тепла.
6. По расчетным данным построить график изменения температуры в точке закрепления термопары и сравнить его с полученным экспериментально.
7. Рассчитать размер зоны термического влияния и скорость охлаждения металла для заданной температуры.
8. Составить отчет и сделать выводы о проделанной работе.

# 3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## 3.1. Физические основы процесса

*Сварочным термическим циклом* называется зависимость изменения температуры от времени в некоторой фиксированной точке тела. Термические способы соединения металлов основаны на нагреве их контактирующих кромок до расплавления, образования общей сварочной ванны и последующей совместной кристаллизации. Однако при этом происходит нагрев не только расплавляющихся кромок, но и прилегающих к сварочной ванне слоев металла, причем температура в них (слоях) уменьшается от температуры плавления до начальной по мере удаления от зоны соединения.

Неравномерный нагрев является источником появления остаточных напряжений и деформаций в полученных заготовках, что приводит, как правило, к ухудшению свойств и изменению формы последних, для ликвидации чего приходится применять дополнительные технологические приемы.

Кроме этого, всеобщего явления многие металлы и сплавы (в том числе и перлитные стали) при нагревах испытывают полиморфные превращения, причем обратные (при охлаждении после сварки) происходят в неравновесных условиях. Это приводит к получению конечных структур, отличающихся от исходных, с измененными свойствами металла, как правило, в худшую сторону.

Естественно, количественная сторона протекающих изменений зависит от режима сварки: чем больше вносится энергии в зону сварки, тем медленней изменяется температура в зоне полиморфных превращений, тем равновесней конечная структура металла. Однако при этом образуется

максимальное поле остаточных напряжений и значительная деформация металла.

Наоборот при малых вносимых энергиях – минимальная деформация, минимальное поле остаточных напряжений, но большая разница в температурах между областью нагрева и остальным холодным металлом, что приводит к большим скоростям охлаждения и появлению неравновесных (закалочных) структур в зоне полиморфных превращений. Иллюстрацией изложенному могут служить математические выражения расчета $\omega_{охл}$ скорости охлаждения металла для:

а) точечного источника (наплавка валика на массивное тело)

$$\omega_{охл} = -\frac{2\pi\lambda(T - T_0)}{\frac{q_и}{V_с}} \quad [град/с] \qquad (1)$$

б) линейного источника (сварка пластин встык за один проход)

$$\omega_{охл} = -2\pi\lambda c\rho\frac{(T - T_0)^3}{\frac{q_и}{(V_с\delta)^2}} \quad [град/с] \qquad (2)$$

где $\lambda$ – коэффициент теплопроводности, [Дж/см·с·град];

$T_о$ – начальная температура (температура подогрева), [ºС]; ;

$T$ – температура, при которой определяется скорость охлаждения;

$q_и$ – эффективная тепловая мощность источника тепла, [Дж/с];

$V_с$ – скорость сварки, [см/с].

$q_п = q_и / V_с$ – погонная энергия, [Дж/см];

Знак минус в уравнениях (1) и (2) показывает, что происходит остывание металла. Скорость охлаждения в условиях сварки оказывает определяющую роль в формировании конечных структур и свойств металла. Знак минус в уравнении (1) показывает, что происходит остывание металла. Скорость охлаждения ω зависит от формы изделия (массивное тело, пластина), погонной энергии $q_п$ и температуры подогрева $T_o$. Температура подогрева практически позволяет в большей степени регулировать скорость охлаждения, чем погонная энергия.

В сталях ферритно-перлитного класса полиморфные превращения происходят при нагревах выше $A_{c1}$ (723 ºС). При этой температуре структура α-железа в зернах перлита, практически мгновенно переходит в структуру γ-железа. В результате зерна перлита превращаются в аустенит. Ферритные зерна стали остаются неизменными вплоть до температуры $A_{c3}$ (~880 ºС), после чего также из α- Fe перестраиваются в γ- Fe.

*Феррит* – твердый раствор углерода в α-железе (кристаллическая решетка α-железа – объемно-центрированный куб-ОЦК).

*Перлит* – эвтектоидная смесь из чередующихся пластинок феррита (α- Fe) и цементита ($Fe_3$ C-карбид железа).

*Цементит* – химическое соединение железа с углеродом .

*Аустенит* – твердый раствор углерода в γ-железа.

При температуре выше $A_{c1}$ цементит распадается, α-Fe переходит в γ-железо. При этом растворимость углерода в железе резко увеличивается, а поскольку пластинки бывшего цементита пересыщены углеродом (6,63%), то он (углерод) начинает интенсивно диффундировать в железо. Чем дольше находится металл при температурах выше $A_{c1}$, тем больше углерода уходит в γ-железо. Процесс «расползания» углерода продолжается до тех пор, пока температура металла не снизится ниже $A_{c1}$. Теперь (термодинамически) структура α-Fe выгодней и металл стремится принять эту форму. Однако растворенный в железе углерод этому мешает,

в результате чего высокотемпературная структура γ-Fe сохраняется и при температурах ниже 723 ºС (неустойчивая форма аустенита).

Поэтому в металле появляются напряжения, которые создают условия для протекания реактивной диффузии (в сторону, где больший процент углерода). В тех местах, где концентрация углерода в результате реактивной диффузии вновь достигнет 6,63% , образуется цементит и ничего не препятствует свободным от углерода участкам γ-Fe перейти в α-Fe (вновь образуется небольшая область перлита). С течением времени весь углерод собирается в определенных местах и все зерно вновь становится перлитным. Естественно, при очень больших скоростях охлаждения, времени для реактивной диффузии нет, и металл приобретает специфическую структуру мартенсита (происходит закалка). Рассмотренное явление нашло свое графическое выражение в виде известных S-образных кривых (рис. 1).

Появление закалочных структур при сварке является вредным, т.к. в мартенсите возникают большие внутренние напряжения, микротрещины, ухудшающие свойства металла. Поэтому следует назначать такие режимы сварки, при которых закалочных структур не образуется. Для решения этого вопроса необходимо знать следующее:

1. Сколько тепла получает сварочное тело от источника теплоты?
2. Как это тепло распространяется по свариваемому телу?
3. Каковы размеры зоны термического влияния (ЗТВ), где температура металла поднималась выше $A_{c1}$ (723 ºС)?
4. Какова скорость охлаждения металла ЗТВ в интервале преобразования аустенита в перлит (от $A_{c1}$ до температуры мартенситного превращения)?

Теплота, выделяемая сварочным источником нагрева, предназначена для расплавления металла изделия и присадочного металла с целью

соединения между собой свариваемых поверхностей. Только некоторая часть энергии, затраченной при сварке, вводится в металл, что связано с потерями теплоты на испарение металла, нагрев шлака или защитного газа и др.

*Эффективной тепловой мощностью* называется количество теплоты, вводимой сварочным источником тепла в металл за единицу времени. Ее можно рассчитать по следующим формулам:

$$q_и = \eta_и q_\partial = \eta_и IU \text{ [Дж/с]} \quad (3)$$

$$q_и = 0.24\eta_и IU \text{ [кал/с]}, \quad (4)$$

где $I$ – ток дуги, [А];

$U$ – напряжение на дуге, [В];

$\eta_и$ – эффективный К.П.Д. сварочной дуги (источника), характеризующий долю тепла сварочного источника теплоты, вводимую в основной металл.

Совершенно очевидно, что одно и то же тепло в зависимости от скорости движения сварочной дуги нагревает металл по разному и размеры ЗТВ будут различными. Боле того, одно и то же тепло, вводимое с одной и той же скоростью сварки нагреет до разных температур например, полубесконечное тело или бесконечно тонкую пластину. В теории сварочных процессов для каждого случая предложена своя математическая модель, позволяющая расчетным путем определить температуру в любой момент времени и в любой точке свариваемого тела.

*Полубесконечное тело*. Дуга, движущаяся по поверхности полубесконечного тела представляется точечным подвижным источником

тепла (тепло вводится в точку, которая перемещается по оси сварного шва со скоростью сварки). Температура в любой точке тела на расстоянии *R* от такого источника теплоты равна:

$$T(R, x) = \frac{q_и}{2\pi\lambda R} e^{-\frac{V_c}{2a}(R+x)} + T_0, \quad (5)$$

где *a* – коэффициент температуропроводности металла, [см$^2$/с];

x – координата до рассматриваемой точки, направленная вдоль оси движения дуги, [см].

*Бесконечно тонкая пластина*. Дуга, движущаяся по ее поверхности прогревает пластину насквозь, поэтому в теории принято считать, что температура пластины в месте расположения дуги по всей толщине одинакова. Дуга, вследствие этого, представляется линейным источником тепла, причем линия ввода тепла расположена перпендикулярно поверхности пластины и проходит через всю ее толщину. Эта линия перемещается со скорость сварки вдоль шва параллельно сама себе. Соответственно этому, температура в любой точке пластины на расстоянии *r* от дуги равна:

$$T(r, x) = \frac{q_и}{2\pi\lambda\delta} e^{-\frac{V_c x}{2a}} K_0, \quad (6)$$

где $\delta$ – толщина пластины, [см];

*e* – экспонента;

$K_o$ – функция Бесселя от аргумента u:

$$u = r\sqrt{\frac{V_c^2}{4a^2} + \frac{b}{a}} \quad (7)$$

$$b = \frac{2a}{c\rho\delta}, \qquad (8)$$

где $c\rho$ – удельная объемная темплоемкость [Дж/см$^3$·град].

*Ширина зоны термического влияния*. Для оценки влияния термического цикла на свариваемый металл необходимо определить ширину 2*l* зоны, нагретой выше заданной температуры $T_l$ (рис.2).

Для мощного быстродвижущегося точечного источника теплоты на поверхности полубесконечного тела ширина ЗТВ равна:

$$2l = \sqrt{\frac{8q_и}{\pi e V_c c\rho(T - T_0)}} \qquad (9)$$

Для мощного быстродвижущегося линейного источника теплоты в пластине ширина ЗТВ равна:

$$2l = \frac{q_и\sqrt{\frac{2}{\pi e}}}{V_c c\rho\delta(T - T_0)} \qquad (10)$$

На практике для упрощения определения ширины зоны нагрева $2\ell$ и мгновенной скорости охлаждения $\omega_{охл}$ применяются номограммы, представленные на рис.3 и 4.

## 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Перед выполнением лабораторной работы самостоятельно изучить теоретическую часть.
2. Зачеканить термопары в пластину размерами 200×200 мм и

толщиной 3-5 мм на заданном расстоянии от оси шва и подключить их к потенциометру.

3. Произвести наплавку валика, фиксируя рабочий ток, напряжение на дуге, скорость и время сварки.
4. Рассчитать термический цикл сварки по одной из формул (5 или 6), экспериментальным данным $I$, $U$, $V_c$ и сравнить его с полученным экспериментально на ленте самописца.
5. Рассчитать размер зоны термического влияния и скорость охлаждения металла для заданной преподавателем температуры.

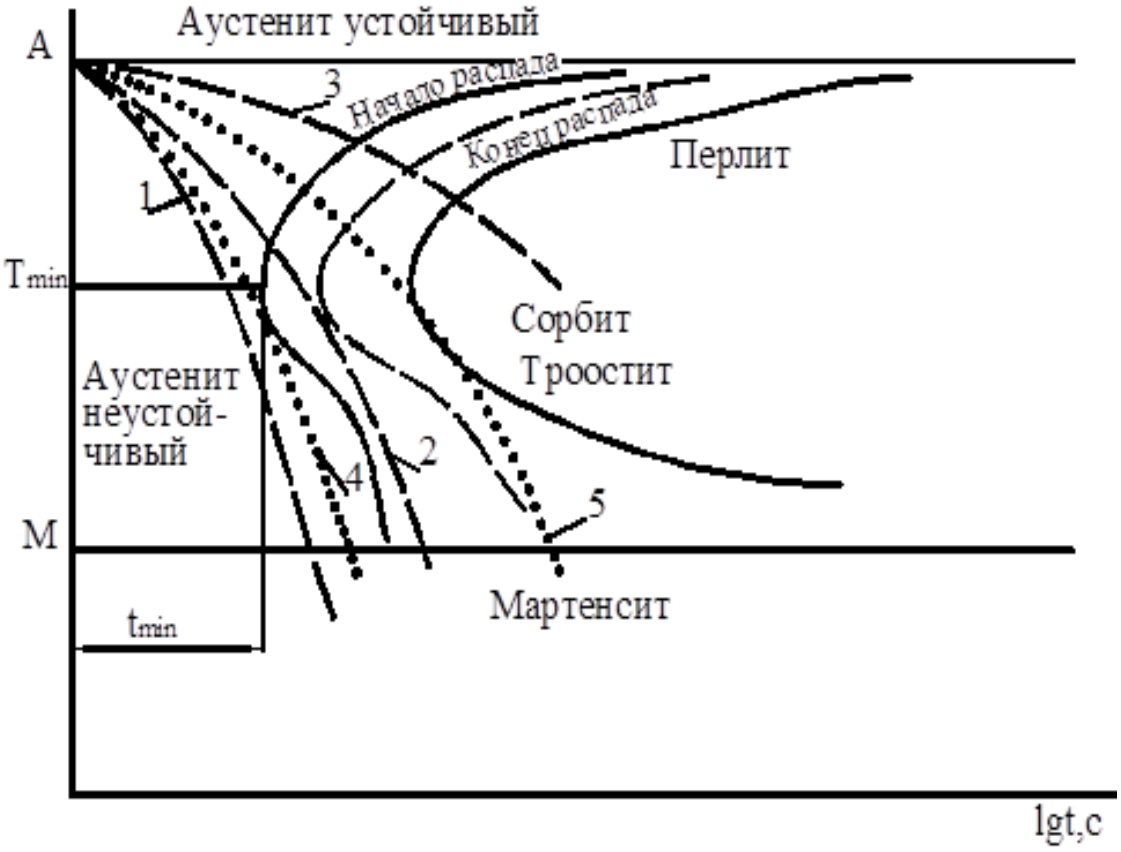



**Рис. 1. Схема оценки конечных структур металла по скоростям охлаждения и *S*-образным кривым распада аустенита при непрерывном охлаждении:**

1 – скорость охлаждения при дуговой сварке стали;
2 – скорость охлаждения при газовой сварке стали;
3 – скорость охлаждения при ЭШС;
4 – скорость охлаждения, при которой структура будет мартенситной;
5 – скорость охлаждения, при которой мартенсит будет исключен.

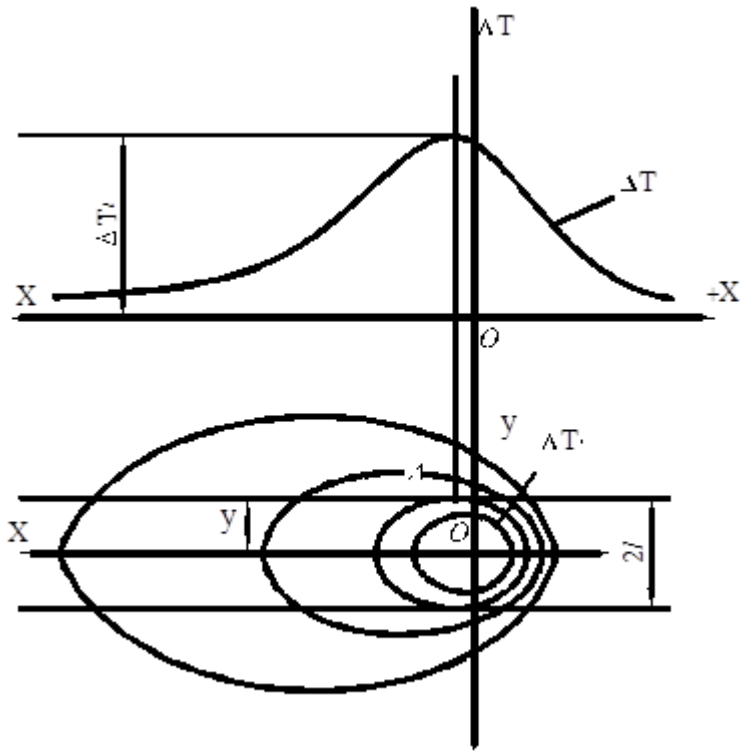



**Рис. 2. Схема для определения ширины 2*l* зоны термического влияния**

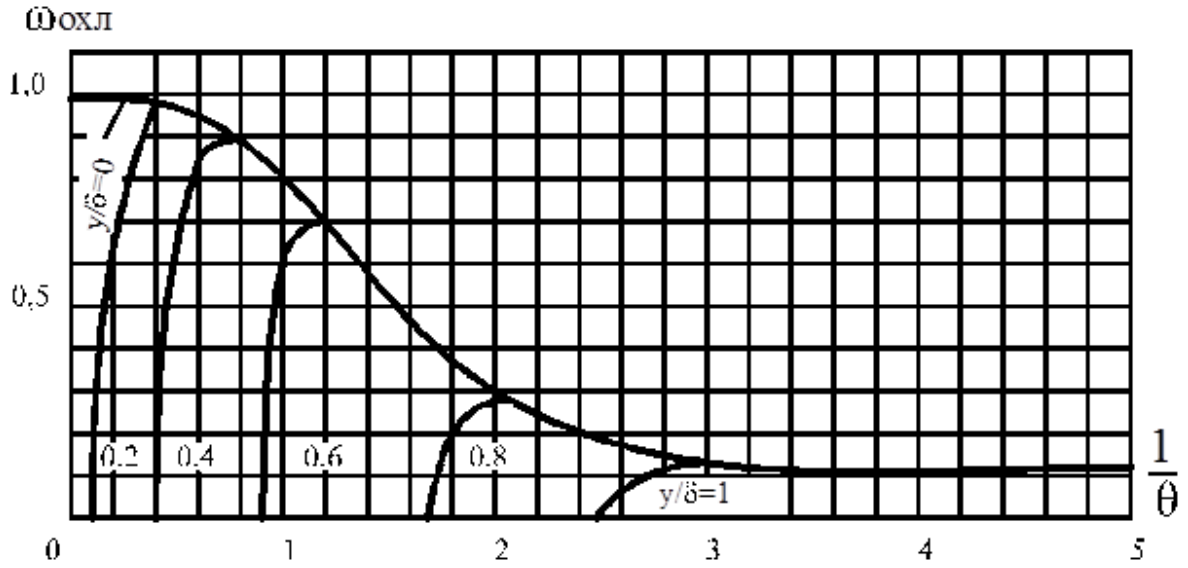



**Рис. 3. Номограмма для определения поправочного коэффициента *k* при расчетах мгновенных скоростей охлаждения в плоском слое**

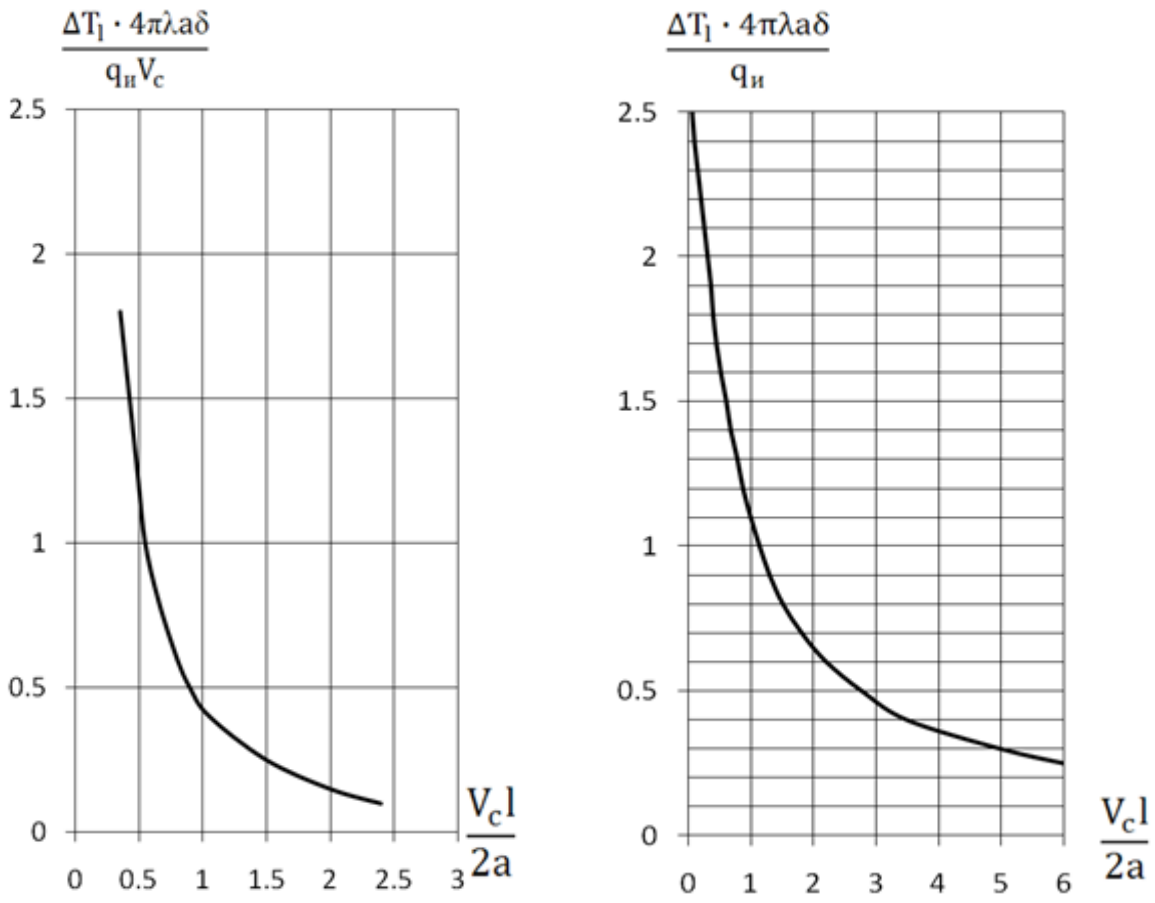



**Рис. 4. Номограммы для определения ширины зоны 2*l* при наплавке валика на полубесконечное тела точечным источником (а) и сварке пластины линейным источником (б).**

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Рисунок схемы определения ширины 2*l* зоны термического влияния.
4. Формулы, результаты расчета, теоретический и наложенный на него экспериментальный графики термического цикла сварки.
5. Формулы, результаты расчета размера зоны термического влияния и скорости охлаждения металла для заданной преподавателем температуры.
6. Выводы о проделанной работе.

## 6. ПЕРЕЧЕНЬ КОНТРОЛЬНЫХ ВОПРОСОВ

1. Что называется эффективной тепловой мощностью источника?
2. Что такое термический цикл сварки?
3. Что такое эффективный К.П.Д дуги?
4. Что такое феррит, перлит?
5. Что такое аустенит, цементит?
6. Какие причины образования остаточных сварочных напряжений и деформаций?
7. Что происходит в сталях ферритно-перлитного класса при их нагреве выше температуры $A_{c1}$?
8. Что такое погонная энергия?
9. При каких условиях образуются закалочные структуры?
10. Какие факторы влияют на мгновенную скорость охлаждения?
11. Что такое ширина зоны термического влияния?
12. Что такое линейный источник тепла?

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6
# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПОДВИЖНЫХ СВАРОЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОТЫ

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить расчетные схемы и овладеть методикой определения температурных полей при действии непрерывно действующих подвижных сварочных источников теплоты.

## 2.СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Изучить теоретическую часть работы.
2. Ознакомиться с оборудованием и материалами, применяемыми при проведении лабораторной работы.
3. Собрать на прихватках две тонкие пластины и на разном расстоянии от оси стыка зачеканить в них термопары, которые затем подсоединить к потенциометру.
4. Произвести сварку пластин в стык за один проход с полным проплавлением.
5. По расчетным данным построить графики распределения температуры по оси шва и на различных расстояниях от оси.
6. Сравнить расчетный график изменения температуры с экспериментальными данными, полученными с помощью термопар.
7. Составить отчет и сделать вывод о проделанной работе.

## 3.ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 3.1 Классификация источников теплоты

По признаку распределенности источники тепла делятся на точечные, линейные, плоские и объемные.

По времени действия источники тепла делятся на мгновенные и не прерывно действующие.

*Точечный источник тепла* - это источник, объем которого бесконечно мал. Примером является нагрев изделия электрической дугой.

*Линейный источник тепла* - это источник, у которого тепло равномерно распределено по линии. Примером является дуговая сварка пластин встык за один проход.

*Плоский источник тепла* - это источник, у которого тепло равномерно распределено по некоторой плоскости. Примером является контактная стыковая сварка.

*Объемный источник тепла* - это источник, равномерно выделяющий тепло в некотором объеме. Примером является протекание тока в электро-де при дуговой сварке.

*Мгновенный источник тепла* - это источник, длительность действия которою стремится к нулю

*Непрерывно действующий источник тепла* - это источник постоянной тепловой мощности, действующий непрерывно или длительное время.

*Неподвижный источник тепла* - это не перемещаюшийся по телу источник тепла постоянной мощности.

*Подвижный источник тепла* - это перемещающийся по телу источник тепла с постоянной скоростью и мощностью.

*Быстродвижущийся источник тепла* - это подвижный мощный источник тепла, перемещающийся с весьма большой скоростью.

## 3 2 Принцип наложения при расчетах подвижных источников теплоты

Для определения уравнений, описывающих процесс распространения теплоты от движущихся непрерывно действующих источников, используют *принцип наложения.*

С этой целью период действия источника теплоты разбивают на бесконечно малые отрезки времени *dt*. Действие источника теплоты в течение бесконечно малого отрезка времени представляют как действие мгновенною источника теплоты $q$.

Суммируя процессы распространения тепла от действующих друг ра другом в разных местах тела мгновенных источников теплоты, получают уравнение температурного поля для подвижного непрерывно действующего источника теплоты.

### 3.3. Подвижный точечный источник теплоты на поверхности полубесконечного тела

Рассмотрим точечный источник теплоты мощности $q$, который движется с постоянной скоростью $v$ прямолинейно из точки $O_0$, в направлении оси .*X* (рис 1).

Наиболее характерным примером для данного случая является наплавка валика на массивное тело.

Используя принцип наложения элементарных источников тепла по линии $O_0O$, получим формулу для определения температуры в любой точке при действии подвижного точечного источника теплоты на поверхности полубесконечного тела в стадии предельного состояния:

$$T(R,x) = \frac{q_и}{2\pi\lambda R} e^{-\frac{v}{2a}(R+x)}, \quad (1)$$

где $q_и$ – источник теплоты постоянной мощности (эффективная тепловая мощность дуги), [Дж/с];

$R$ – расстояние до точки А, в которой необходимо определить температуру, [см]; $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$;

$x$ - абсцисса точки $A$ в подвижной системе координат, [см];

$v$ - скорость передвижения источника тепла (скорость сварки), [см/с];

$\lambda$ - коэффициент теплопроводности металла, $[\frac{\text{Дж}}{\text{см·с·град}}]$;

$a$ - коэффициент температуропроводности металла, [см$^2$/с].

Эффективную тепловую мощность дуги можно определить по следующим формулам:

$$q_и = \eta_и q_д = \eta_и IU \text{ [Дж/с]} \quad (2)$$

$$q_и = 0.24\eta_и IU \text{ [кал/с]}, \quad (3)$$

где $I$ – ток дуги, [А];

$U$ – напряжение дуги, [В];

$\eta_и$ – эффективный К.П.Д. процесса нагрева изделия дугой, характеризующий долю тепла сварочного источника теплоты, вводимую в основной металл.

Анализ уравнения (1) дает возможность установить, что при увеличении скорости перемещения изменение температур по оси $X$ происходит таким образом, что передняя ветвь 1 кривой (рис. 2) становится круче, тогда как ветвь 2 за источником тепла остается неизменной.

При $R \approx -x$ температура для задней ветви 2 не зависит от скорости движения источника тепла, т.к. уравнение (1) будет иметь вид:

$$T(x) = \frac{q_и}{2\pi\lambda x} , \quad (4)$$

Температурное поле предельного состояния при движении точечного источника теплоты симметрично относительно оси $X$ (рис. 3). Изотермы на поверхности полубесконечного тела представляют собой овальные кривые, которые очень близко расположены друг к другу впереди источника теплоты и значительно удалены позади источника. На рис. 3 пунктирной линией соединены точки с максимальной температурой на плоскости $XOY$.

Область впереди пунктирной кривой нагревается, а позади кривой – остывает.

Температура точек тела при приближении источника теплоты резко возрастает, достигая максимального значения, а затем убывает, причем снижение температуры происходит с меньшей скоростью, чем подъем (рис. 4).

Если в уравнении (1) принять $v = 0$. т е. источник тепла неподвижен, то будем иметь случай стационарного температурного поля в полубесконечном теле:

$$T(R) = \frac{q_и}{2\pi\lambda R}\ , \qquad (5)$$

Температура точек тела в этом случае прямо пропорциональна мощности источника теплоты $q$ и обратно пропорциональна расстоянию $R$ от источника тепла и коэффициенту теплопроводности λ.

### 3.4 Подвижный линейный источник теплоты в бесконечной пластине

Рассмотрим линейный источник теплоты мощности $q$, который движется с постоянной скоростью $v$ прямолинейно из точки $O_0$ в направлении оси $X$ (рис.5).

Этот случай является характерным при сварке пластин встык за один проход с полным проплавлением (рис.6).

Используя принцип наложения, получим формулу для определения температуры в любой точке пластины при действии подвижного точечного источника теплоты в стадии предельного состояния:

$$T(r,x) = \frac{q_и}{2\pi\lambda\delta} e^{-\frac{vx}{2a}} K_0(u), \qquad (6)$$

где $K_o(u)$ – функция Бесселя от аргумента

$$u = r\sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{a}{b}}, \quad (7)$$

где $b = \frac{2\alpha}{c\rho\delta}$ – коэффициент температуроотдачи, [1/с];

α – коэффициент поверхностной теплоотдачи, $[\frac{\text{Дж}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{град}}]$;

$c\rho$ – удельная объемная теплоемкость, $[\frac{\text{Дж}}{\text{см}^3 \cdot \text{град}}]$;

δ – толщина пластина, [см].

Для того, чтобы решить уравнение (6) необходимо определить функцию Бесселя Эта функция хорошо изучена и чтобы ее определить достаточно вычислить аргумент $u$ по формуле (7), а затем по таблице (интегралов) найти значение это функции.

Картина распределения температуры в пластине и на поверхности полубесконечного тела качественно имеют много общего. Отличие заключается в том, что распределение температур в пластине на отрицательной оси $X$ (за источником тепла) зависит от скорости сварки и, в отличии от полубесконечного тела. Кроме того, изотермы в пластине более вытянуты, чем в полубесконечном теле. Если в уравнении (6) принять $v$=0, то будем иметь случай стационарного температурного поля в пластине:

$$T(r) = \frac{q_и}{2\pi\lambda\delta} K_0(r\sqrt{\frac{b}{a}}), \quad (8)$$

В отличие от полубесконечного тела, где стационарное состояние достигается благодаря значительному теплоотводу в трех направления, стационарное состояние в пластине возможно лишь при наличии теплоотдачи в окружающую среду.

## 4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. До выполнения лабораторной работы самостоятельно изучить теоретическую часть.
2. Перед сваркой собрать на прихватках две тонкие пластины (размерами 200 х 300 мм) с зазором 1 мм.
3. Зачеканить термопары (на 0,5 толшины пластины) с нижней поверхности пластин на расстоянии 10. 20, 30, 40 мм от кромки оси, перпендикулярной к стыку, и подключить их к потенциометру.
4. Произвести сварку пластин в стык за один проход, фиксируя рабочий ток, напряжение на дуге, скорость и время сварки.
5. По расчетным данным, сведенным в таблицу, построить графики распределения температуры по оси шва и на различном расстоянии от оси.
6. Сравнить расчетный график распределения температуры с экспериментальными данными, полученными с помощью термопар.
7. Определить длину сварочной ванны по построенному графику распределения температуры в пластине.

**Сводные данные для расчета температуры**

| *X*, см | *r*, см | $-\frac{vx}{2a}$ | $e^{-\frac{vx}{2a}}$ | $u = r\sqrt{\frac{v^2}{4a^2}+\frac{a}{b}}$ | $K_0(u)$ | *T*, ℃ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 1 | | | | | | |
| 0 | | | | | | |
| -1 | | | | | | |
| -2 | | | | | | |
| -4 | | | | | | |
| -8 | | | | | | |
| x=-2 y=0 | | | | | | |
| x=- y=0 | | | | | | |

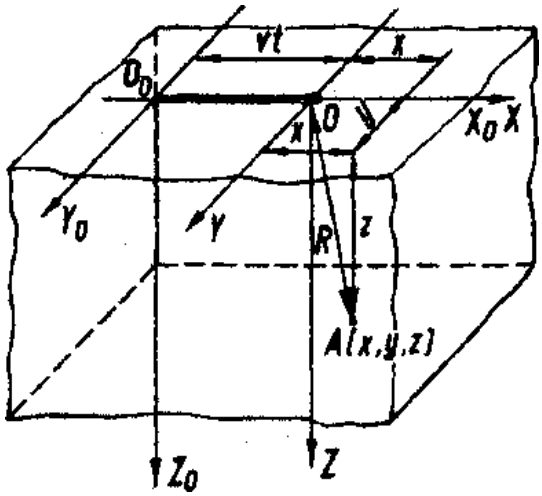



**Рис. 1. Схема подвижного точечного источника теплоты на поверхности полубесконечного тела**

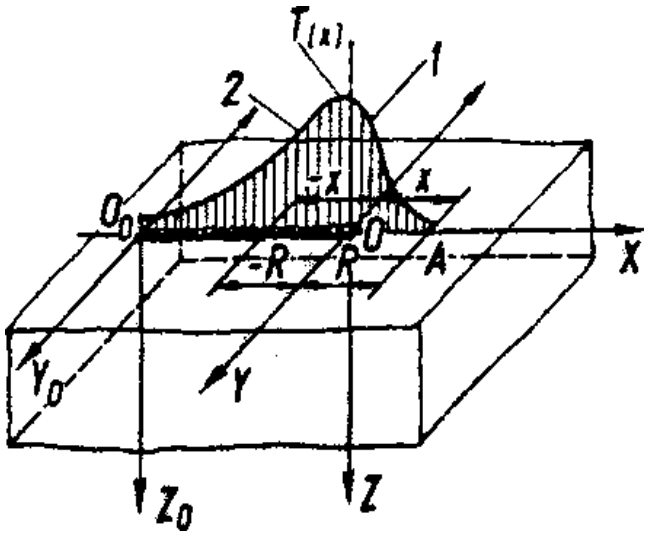



**Рис 2 Характер распределения температуры вдоль оси шва на поверхности полубесконечного тела.**

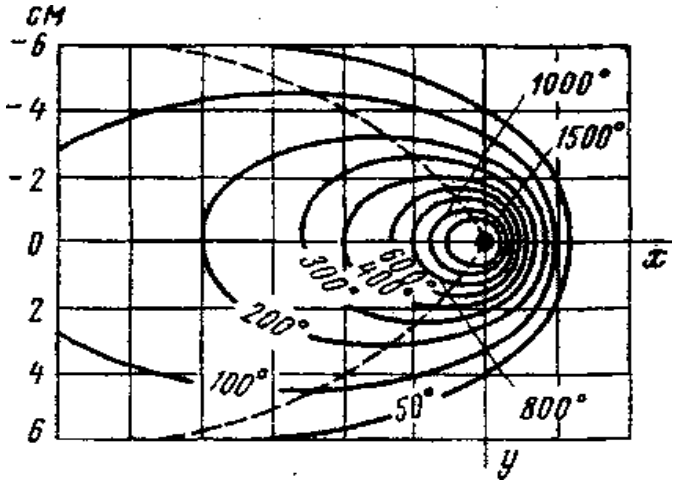



**Рис 3. Изотермы на поверхности полубесконечного тела в плоскости XOY**

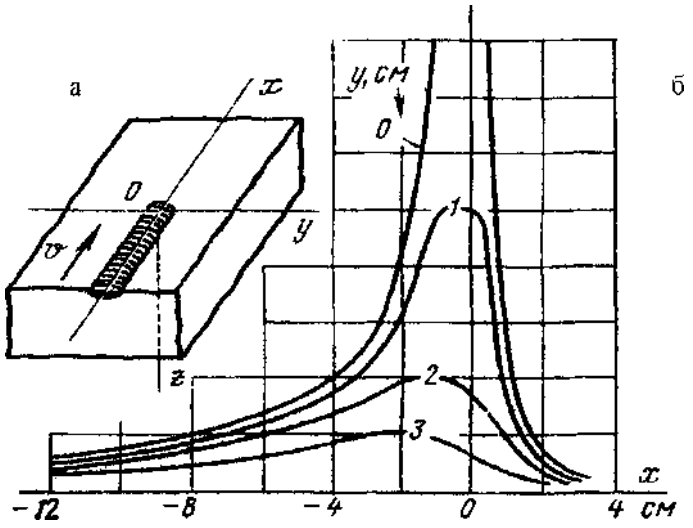



**Рис 4 Схема наплавки (а) и характер распределения температуры на поверхности полубесконечного по прямым, параллельным оси X (б)**

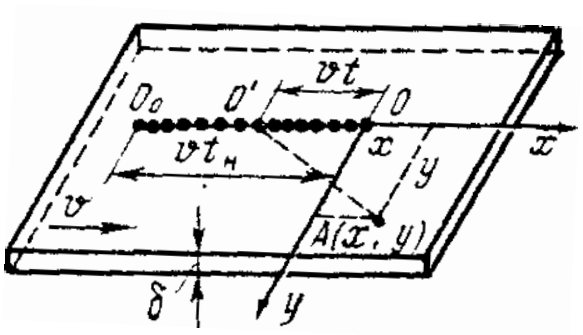



**Рис 5. Схема подвижного точечного источника теплоты в бесконечной пластине.**

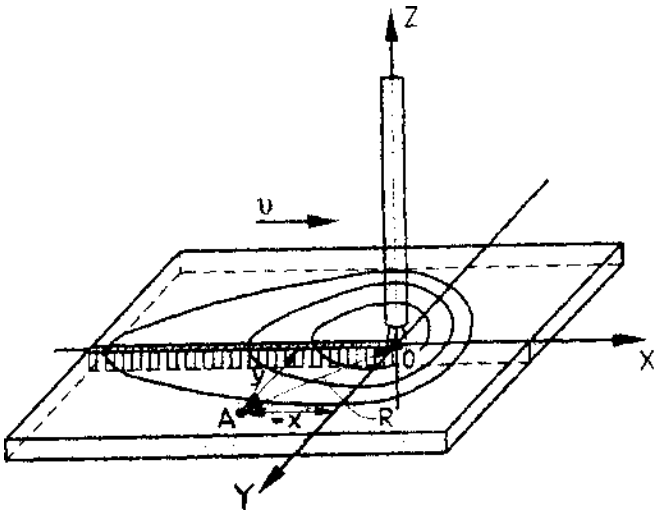



**Рис 6. Схема сварки пластин в стык за один проход с полным проплавлением**

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Схема сварки пластин в стык за один проход.
4. Таблица сводных данных для расчета температуры
5. Результаты расчета температуры для разных расстояний от оси шва.
6. Графические зависимости распределения температуры в пластине, полученные расчетным и экспериментальным путем.
7. Выводы о проделанной работе.

## 7. ПЕРЕЧЕНЬ КОНТРОЛЬНЫХ ВОПРОСОВ

1. Как классифицируются источники теплоты по признаку распределенности и времени действия?
2. Дать определение точечного и линейного источников тепла.
3. Дать определение плоского и объемного источников тепла.
4. Дать определение мгновенного и непрерывно действующего источников тепла.
5. Дать определение подвижного и быстродвижущегося источников тепла.
6. Что такое принцип наложения источников тепла?
7. Как определяется эффективная тепловая мощность дуги?
8. Что такое эффективный К.П.Д. процесса нагрева изделия дугой?
9. Как влияет увеличение скорости сварки на кривую распределеня температуры вдоль оси шва?
10. В чем отличие распределения температурного поля в пластине и на поверхности полубесконечного тела?

# 8. СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ


1. Теория сварочных процессов. / В.М. Неровного МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007 - 752с.
2. Лысак В.И., Кузьмин С.В. «Сварка взрывом» - М.: Машиностроение, 2005.- 543 с.
3. Фролов В. Специальные методы сварки и пайки: учебник / Альфа-М, 2013.-224 с
4. Конюшков Г.В., Мусин Р.А. Специальные методы сварки давлением / Ай Пи Эр Медиа, 2009. - 632 с.
5. Сидоров В.П. Теория и технология сварочных процессов: сборник задач / Тольятти: ТГУ, 2009. - 228с.
6. Петров Г.Л., Тумарев А.С. Теория сварочных процессов. – М.: Высшая школа, 1977. – 389 с.
7. Багрянский К.В., Добротина З.А., Хренов К.К. Теория сварочных процессов. – Киев: Высшая школа, 1976. – 424 с.
8. Махненко В.И. Тепловые процессы при сварке / Сварка в СССР: справочник, т.2 – М.: Наука, 1981. – 494 с.
9. Волченко В.Н. Источники энергии сварочных процессов. – М.: Машиностроение, 1971. – 75 с.
10. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1954. – 296 с.

У ч е б н о е  и з д а н и е

Валентин Олегович **Харламов**

Святослав Викторович **Хаустов**

# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В СВАРКЕ

*Учебно-методическое пособие*

Редактор Н. Н. Кваша

Темплан 2016 г. Поз. № 223.
Подписано в печать 06.12.2016. Формат 60х84 1/16. Бумага газетная.
Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 4,65. Уч.-изд. л. 3,55.
Тираж 50 экз. Заказ .

Волгоградский государственный технический университет.
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 1.

Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолгГТУ.
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.