

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Тольяттинский государственный университет

# ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВАРКЕ

Лабораторный практикум

Составитель  
А.И. Ковтунов

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», 2023

ISBN 978-5-8259-1338-4

УДК 621.791.01(075.8)

ББК 34.641-1я73

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Сварочное производство и материаловедение» Пензенского государственного университета *А.Е. Розен*;

д-р техн. наук, профессор Тольяттинского государственного университета *В.В. Ельцов*.

Тепловые процессы при сварке : лабораторный практикум / сост. А.И. Ковтунов. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2023. – 1 оптический диск. – ISBN 978-5-8259-1338-4.

В лабораторном практикуме приведены методические указания для выполнения лабораторных работ по тепловым процессам при сварке в рамках изучения дисциплины «Теория сварочных процессов». Изложены цели работы, теоретические сведения, порядок выполнения работ и контрольные вопросы. Дается описание применяемого оригинального лабораторного оборудования, принципа его действия, а также применяемых материалов и оснастки.

Лабораторный практикум предназначен для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 15.03.01 «Машиностроение», направленность (профиль) «Технологии сварочного производства и инженерия поверхностей», очной и заочной форм обучения.

Текстовое электронное издание.

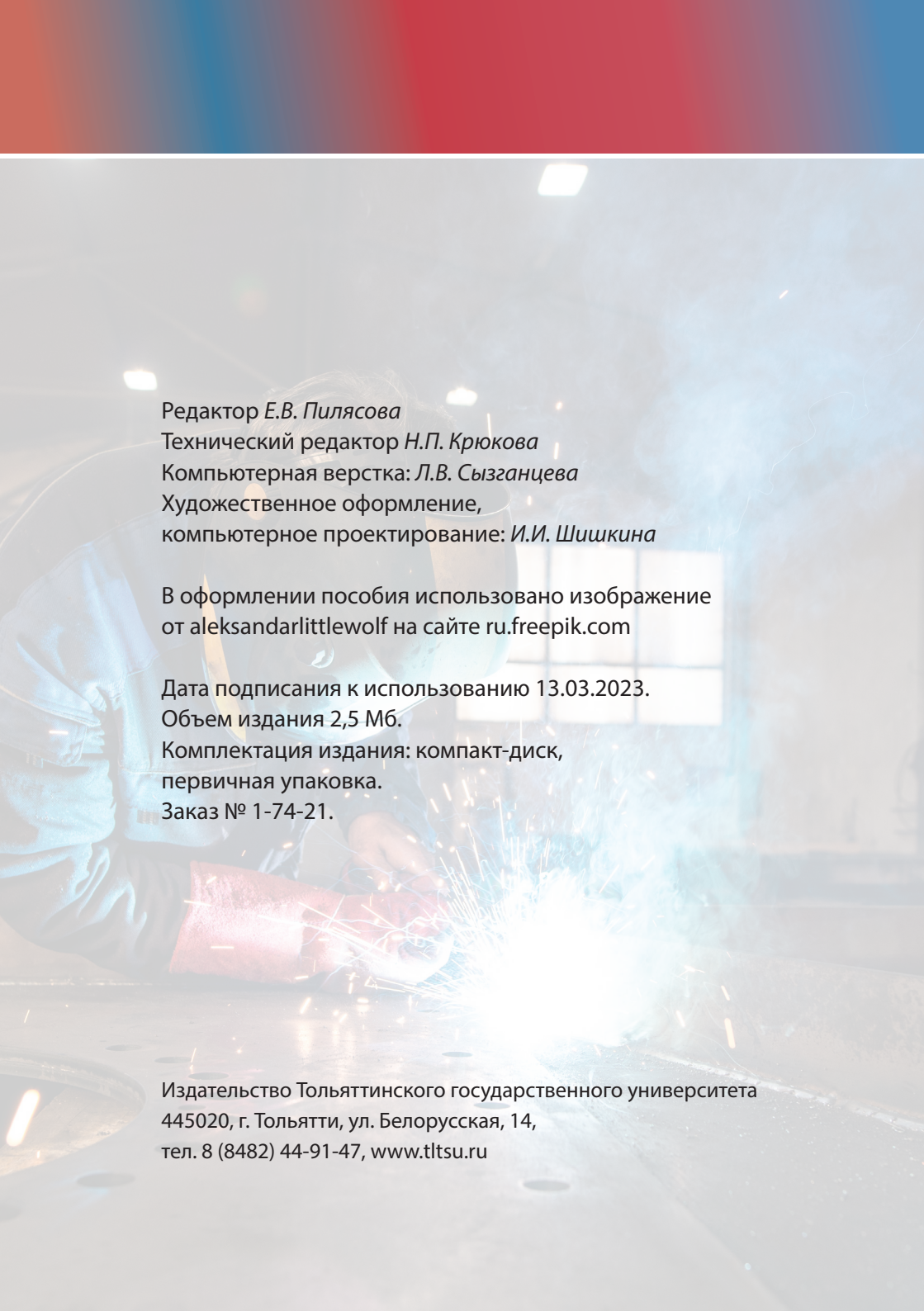
Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8/10; PIII 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; CD-ROM; Adobe Acrobat Reader.

© Ковтунов А.И., 2023

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский  
государственный университет», 2023





Редактор *Е.В. Пилясова*  
Технический редактор *Н.П. Крюкова*  
Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*  
Художественное оформление,  
компьютерное проектирование: *И.И. Шишкина*

В оформлении пособия использовано изображение от [aleksandarlittlewolf](https://www.freepik.com) на сайте [ru.freepik.com](https://www.freepik.com)

Дата подписания к использованию 13.03.2023.

Объем издания 2,5 Мб.

Комплектация издания: компакт-диск,  
первичная упаковка.

Заказ № 1-74-21.

Издательство Тольяттинского государственного университета  
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,  
тел. 8 (8482) 44-91-47, [www.tltsu.ru](http://www.tltsu.ru)

## Содержание

Введение .....	5
Лабораторная работа 1. Определение температуры металла при сварке .....	6
Лабораторная работа 2. Экспериментальные исследования процесса распределения тепла при сварке точечным источником тепла .....	19
Лабораторная работа 3. Исследование влияния режимов сварки плавлением на температурное поле .....	35
Лабораторная работа 4. Экспериментальные и расчетные исследования влияния режимов сварки и теплофизических свойств основного металла на размеры сварочной ванны .....	41
Рекомендуемая литература .....	47

## Введение

Лабораторный практикум предназначен для студентов очной и заочной форм обучения, изучающих дисциплину «Теория сварочных процессов» и обучающихся по направлению подготовки бакалавров 15.03.01 «Машиностроение», направленность (профиль) «Технологии сварочного производства и инженерия поверхностей». Целью освоения дисциплины является обеспечение формирования у студентов профессиональных компетенций в области теории процессов, происходящих при сварке, обобщение их в стройную систему теоретических знаний, базирующихся на последних достижениях сварочной науки и производства.

Цель лабораторного практикума – формирование у студентов профессиональных знаний, умений и навыков в области экспериментальных и теоретических исследований тепловых процессов при сварке.

Задачи практикума:

1) изучение методов и оборудования для контроля температуры металлов при экспериментальных исследованиях тепловых процессов при сварке;

2) изучение методов и приобретение навыков исследования влияния режимов сварки на распределение температур при действии точечного неподвижного и непрерывно движущегося источника тепла на поверхности полубесконечного тела;

3) изучение методик экспериментальных и расчетных исследований влияния режимов сварки и теплофизических свойств основного металла на размеры сварочной ванны.

В ходе выполнения лабораторных работ студент приобретает: необходимый уровень теоретических знаний в области тепловых процессов при сварке; умения по планированию и проведению экспериментальных и теоретических исследований процессов распространения тепла при сварке; навыки обработки экспериментальных и теоретических данных исследований сварочных тепловых процессов.

# **Лабораторная работа 1**

## **Определение температуры металла при сварке**

**Цель работы** — изучить методы и оборудование для контроля температуры металлов и сплавов при исследовании тепловых процессов при сварке.

### **Краткие теоретические сведения**

#### **Контроль температуры при исследовании тепловых процессов при сварке**

##### **1. Тепловые процессы при сварке**

Большинство способов сварки металлических материалов связаны с нагревом свариваемых деталей при использовании различных видов сварочных источников теплоты. Особенности протекания процессов нагрева и охлаждения свариваемых деталей определяют условия формирования структуры, фазового состава металла в шве и зоне термического влияния и, следовательно, механические и эксплуатационные свойства сварных соединений.

От тепловых условий сварки зависит производительность плавления основного и присадочного материала, протекание физико-химических процессов в сварочной ванне. Тепловые условия в способах сварки термомеханического и термического класса в основном определяют эффективность того или иного процесса сварки. Деформации, характер и уровень остаточных напряжений также определяются условиями нагрева и охлаждения свариваемых деталей.

При проектировании сварных конструкций, разработке технологий и оборудования для сварки часто возникает необходимость в теоретических и экспериментальных исследованиях тепловых процессов при сварке.

*Температура* — это термодинамическая величина, характеризующая степень нагретости вещества и определяющая направление передачи энергии путем теплообмена.

За единицу измерения температуры в России принят градус — одна сотая международной стогоградусной шкалы, по которой температуре таяния льда и кипения воды при нормальном давлении соответствуют значения 0 и 100 °С соответственно.

Международная практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ–68) разработана таким образом, чтобы температура, измеряемая по ней, была насколько возможно близкой к термодинамической. Измерения по этой шкале могут быть выполнены достаточно легко и с высокой воспроизводимостью, в то время как прямые измерения термодинамической температуры весьма трудоемки и недостаточно точны.

Международную практическую температурную шкалу можно градуировать и в кельвинах (К), и в градусах Цельсия (°С). Соотношение между температурами по любой из этих шкал:

$$T_{68} = t_{68} + 273,15, \quad (1.1)$$

где  $T_{68}$  – абсолютная температура, К;  $t_{68}$  – температура, °С.

Размер кельвина и градуса Цельсия один и тот же для разности температур.

МПТШ–68 основана на ряде воспроизводимых равновесных состояний, которым приписаны определенные значения температур (основные реперные точки), и на эталонных приборах, градуированных при этих температурах. Равновесные состояния и приписанные им значения термодинамической температуры приведены в табл. 1.1. В диапазонах между реперными точками интерполяцию осуществляют по формулам, устанавливающим связь между показаниями эталонных приборов и значениями термодинамической температуры.

Эталонным прибором, используемым в диапазоне температур от –13,81 К до 630,74 °С, является платиновый термометр сопротивления. Его чувствительный элемент должен быть изготовлен из свободной от напряжений отожженной чистой платиновой проволоки. Относительное сопротивление  $W(T_{68})$  термометра определяется как

$$W(T_{68}) = R(T_{68}) / R(273,15 \text{ К}),$$

где  $R$  – сопротивление термометра (не должно быть меньше 1,39250 Ом) при  $T_{68} = 373,15$  К. Для температур ниже 0 °С соотношение между сопротивлением термометра и температурой определяется с помощью стандартной функции и специальных уравнений

для вычисления поправок к этой функции; в диапазоне температур 0–630,74 °С – двумя уравнениями в форме полиномов.

Таблица 1.1

Основные реперные (постоянные) точки МПТШ–68

Состояние фазового равновесия	$T$ , К	$t$ , °С
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами равновесного водорода (тройная точка равновесного водорода)	13,81	–259,34
Равновесие между жидкой и парообразной фазами равновесного водорода при давлении 33330,6 Па (25/76 норм. атмосферы)	17,042	–256,108
Равновесие между жидкой и парообразной фазами равновесного водорода (точка кипения равновесного водорода)	20,28	–252,87
Равновесие между жидкой и парообразной фазами неона (точка кипения неона)	27,102	–246,048
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами кислорода (тройная точка кислорода)	54,361	–218,789
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами аргона (тройная точка аргона)	83,798	–189,352
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами кислорода (точка росы кислорода)	90,188	–182,962
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами воды (тройная точка воды)	273,16	0,01
Равновесие между жидкой и парообразной фазами воды (точка кипения воды)	373,15	100
Равновесие между твердой и жидкой фазами олова (точка затвердевания олова)	505,1181	231,9681
Равновесие между твердой и жидкой фазами цинка (точка затвердевания цинка)	692,73	419,58
Равновесие между твердой и жидкой фазами серебра (точка затвердевания серебра)	1235,08	961,93
Равновесие между твердой и жидкой фазами золота (точка затвердевания золота)	1337,58	1064,43



Эталонным прибором, используемым в диапазоне температур 630,74–1064,43 °С, является термоэлектрический термометр с электродами из платинородия (10 % родия) и платины.

Для температур выше 1064,43 °С (1337,58 К) термодинамическая температура определяется в соответствии с законом излучения Планка при использовании в качестве опорной температуры значения 1064,43 °С (1337,58 К) и принятого значения константы  $C_2 = 0,014388 \text{ м} \cdot \text{К}$ .

Термодинамически температура наряду с давлением и концентрацией является одной из степеней свободы, определяющих физико-химическое состояние любой реальной многофазной системы. Научное исследование гетерогенной системы в области физической химии, теории металлургических процессов, сварочного производства и литейного производства должно проводиться со строгим учетом температурных условий.

Промышленность не знает технологических процессов, не обусловленных температурным режимом. Особенно велико значение температуры металла как технологического фактора в металлургическом, литейном и сварочном производствах.

## **2. Способы определения температуры металла**

Температура как мера внутренней энергии тела не поддается непосредственному измерению. Однако различные формы проявления внутренней энергии тела позволяют использовать их для измерения температуры.

Для измерения температуры используются как косвенные, так и прямые методы. Косвенным принято называть такое измерение некоторой физической величины, при котором искомое ее значение находят путем расчета на основании известной функциональной связи между этой физической величиной и другими, непосредственно измеряемыми. Примерами косвенного измерения температуры, именно термодинамической температуры, являются результаты расчета ее значений по измеренному давлению идеального газа при постоянном объеме по формуле Клапейрона, по измеренной мощности теплового шума по уравнению Найквиста и др.

Для определения с требуемой точностью температур объектов такими косвенными измерениями в большинстве случаев необ-

ходимо выполнять с высокой точностью абсолютные измерения связанных с температурой других физических величин. При этом создаются такие условия измерений, по возможности близкие к идеальным, для которых справедливы используемые теоретические соотношения.

Это приводит к тому, что косвенные (абсолютные) измерения температур применяются только в эталонных работах или научных исследованиях с использованием наиболее совершенных средств измерительной техники, и, следовательно, распространенность их довольно ограничена.

Измерения температур в различных отраслях техники, в науке и во многих областях жизнедеятельности человека осуществляются путем преобразования температуры в какую-либо другую физическую величину, подвергающуюся непосредственному измерению с помощью соответствующих средств. При этом средства измерений с помощью образцовых приборов градуируются и их отсчет или выходной сигнал выражается по МПТШ. Тем самым осуществляется прямое измерение температуры либо в кельвинах, либо в градусах Цельсия.

Необходимость преобразования температуры в другую физическую величину нашла свое отражение в названии приемного блока средств измерений: первичный преобразователь.

Операция градуировки первичного преобразователя состоит в экспериментальном определении зависимости выходного сигнала  $U$  от входного сигнала — температуры  $t$ . Такая зависимость называется градуировочной характеристикой или статической характеристикой преобразователя. Для большинства преобразователей градуировочная характеристика  $U(t)$  нелинейна. В некоторых случаях эта зависимость линейна:

$$U = kt,$$

где  $k$  — коэффициент преобразования.

Как правило, прямое измерение температуры осуществляется отсчетом по шкале измерительного прибора, которая наносится с учетом зависимости  $U(t)$ , либо с помощью градуировочного графика  $U(t)$  или градуировочной таблицы.

Значения  $U(t)$  преобразователя внутри его рабочего диапазона определяются при дискретных значениях температур, причем каждое из этих значений  $t$  остается постоянным в процессе отсчета значения выходного сигнала  $U$ .

Осредненная статическая характеристика, установленная для преобразователей данного типа, носит название номинальной статической характеристики (НСХ) преобразователя.

В зависимости от характера контактирования первичного преобразователя с объектом, температуру которого измеряют, методы измерений температур разделяются на две основные группы – контактные и бесконтактные.

Контактными методами измерений температур называют такие, применение которых требует наличия механического контакта первичного преобразователя с объектом измерения, и теплообмен между ними определяется теплопередачей путем теплопроводности и (или) конвекции.

Большинство контактных методов измерений требует наличия линий связи первичного преобразователя со средствами измерения его выходного сигнала. Однако некоторые из них применяются без линий связи и отсчет температуры осуществляется наблюдателем по визуально фиксируемой реакции преобразователя. Большое число этих методов вызвано чрезвычайным разнообразием объектов и условий измерений, очень широким диапазоном измеряемых температур – от криогенных до 2500 °С, требованиями довольно высокой точности измерений и нередко высоким ресурсом, в ряде случаев достигающим десятков тысяч часов непрерывной эксплуатации.

Дать исходные данные для выбора того или иного метода измерений в данных конкретных условиях – одна из основных задач термометрии.

Все бесконтактные методы измерений температур (методы пирометрии) основываются на использовании того или иного свойства теплового излучения объекта. Это излучение воспринимается дистанционно расположенным приемником. Тем самым передача информации о температурном состоянии объекта осуществляется лучистой энергией, испытывающей в ряде случаев искажения по пути от объекта к приемнику.

Методы пирометрии в зависимости от характера спектра излучения объекта разделяют на две основные группы:

- 1) для тел со сплошным спектром излучения (такой спектр характерен для большинства твердых тел и их расплавов);
- 2) тел с линейчатым или полосовым спектром излучения (атомарные и молекулярные спектры газов и жидкостей).

Основные методы пирометрии излучения первой группы приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Основные методы пирометрии для тел со сплошным спектром излучения

№ п/п	Свойство спектра излучения объекта	Наименование средства измерения
1	Интегральная энергетическая яркость тела, описываемая с достаточным приближением для абсолютно черного тела законом Стефана – Больцмана	Пирометры полного излучения (радиационный пирометр)
2	Энергетическая яркость тела в ограниченном интервале длин волн, не позволяющем применить ни формулу Планка, ни закон Стефана – Больцмана	Пирометры частичного излучения
3	Энергетическая яркость тела в узком спектральном интервале, позволяющем для описания использовать формулу Планка	Квазимонохроматические пирометры (яркостный или оптический пирометр)
4	Спектральное распределение энергетической яркости тела	Пирометры спектрального распределения
5	Отношение энергетических яркостей в двух спектральных интервалах	Пирометры спектрального отношения (цветовой пирометр)
6	Отношение энергетических яркостей в трех и более спектральных интервалах	Пирометры многократного спектрального отношения

Большинство методов пирометрии, приведенных в табл. 1.2, реализовано в средствах измерения различного конструктивного оформления, которые серийно выпускаются отечественной промышленностью как приборы широкого массового применения.



Методы измерения температур по атомарным или молекулярным спектрам применяются с использованием спектральной аппаратуры исследования раскаленных газовых потоков, пламени, плазмы. Некоторые из этих методов используются для определения неравновесных температур в процессах с интенсивным выделением тепловой энергии.

Для измерения температуры жидкого металла чаще всего в металлургии применяются термоэлектрические преобразователи и пирометры.

### **3. Приборы для определения температуры при исследовании сварочных тепловых процессов**

*Термоэлектрические преобразователи.* Самое широкое распространение в заводской практике имеют термоэлектрические преобразователи, так как обладают рядом преимуществ перед другими вышеуказанными приборами, а именно:

- 1) термоэлектрическими преобразователями можно производить измерения в очень широком диапазоне температур;
- 2) такие преобразователи отличаются высокой точностью измерения;
- 3) показания термоэлектрического преобразователя можно передавать на большие расстояния и автоматически записывать.

В основе измерения температуры термоэлектрическими преобразователями лежат термоэлектрические явления. Эти явления заключаются в том, что в цепи, составленной из двух соединенных между собой неоднородных проводников (рис. 1.1), при наличии неодинаковых температур в точках соприкосновения 1 и 2 возникает термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС), величина которой зависит от значения этих температур. Эта зависимость выражается формулой

$$E_{AB}(T_1, T_0) = e_{AB}(T_1) - e_{AB}(T_0), \quad (1.2)$$

т. е. термо-ЭДС, возникающая в цепи, составленной из двух неодинаковых проводников, равна разности электродвижущих сил на концах последних. В свою очередь термо-ЭДС  $e_{AB}(T_1)$  и  $e_{AB}(T_0)$ , возникающие на концах проводников, зависят только от температуры этих концов. В общем виде это можно выразить так:

$$e = f(T).$$

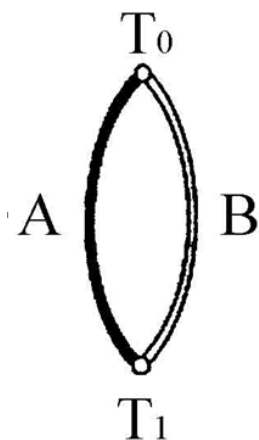


Рис. 1.1. Термоэлектрическая цепь из двух проводников

Итак, формула, выражающая зависимость термо-ЭДС в цепи, составленной из проводников  $A$  и  $B$ , от температуры  $T_1$  и  $T_0$  в местах соединения будет

$$E_{AB}(T_1, T_0) = f(T_1) - f(T_0).$$

Зависимость термо-ЭДС от температуры, т. е.  $e = f(T_1)$ , может быть определена только опытным путем.

Для измерения термо-ЭДС в цепь вводится электроизмерительный прибор.

Соединенные между собой разнородные проводники  $A$  и  $B$  называют термопарами, а отдельно проводники — термоэлектродами. Конец термопары, помещаемый в среду, температура которой измеряется, называется рабочим концом (горячий спай), а конец, помещаемый в среду более низкой и известной температуры, — свободным концом (холодный спай).

Величина развиваемой термопарой термо-ЭДС зависит от температуры как рабочего, так и свободного конца. Лишь в тех случаях, когда температура свободного конца остается неизменной и, следовательно, второй член формулы равен некоторой постоянной величине  $C$ , термо-ЭДС, развиваемая термопарой, будет функцией только температуры рабочего конца:

$$E_{AB}(T_1, T_0) = f(T_1) - C = \phi(T_1). \quad (1.3)$$

Следовательно, для получения правильных результатов измерения очень важно поддерживать постоянное значение температуры свободного конца. Абсолютное значение термо-ЭДС очень невелико (порядка милливольт), поэтому для измерения следует применять чувствительные приборы – милливольтметры или потенциометры.

Существует очень много проводников, которые в паре друг с другом образуют термопару. Однако практическое применение получило ограниченное количество термопар, так как к термопарам, а следовательно, и к термоэлектродным материалам предъявляются серьезные требования, главнейшими из которых являются: высокая окалиностойкость; постоянство термоэлектрической характеристики в течение длительного промежутка времени в пределах измеряемых температур; возможно большая термо-ЭДС и однозначная (желательно линейная) зависимость от температуры; однородность материала (гомогенность); низкая стоимость.

В России установлены для широкого применения шесть типов термоэлектрических преобразователей, некоторые характеристики которых приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Типы термоэлектрических преобразователей

№ п/п	Наименование термоэлектрического преобразователя	Обозначение	Диапазон температур длительно-го применения, °С	Предел температур при кратковременном применении, °С
1	Медь – копель	ТМК(М)	–200–350	400
2	Хромель – копель	ТХК (L)	–200–700	900
3	Хромель – алюмель	ТХА(К)	–200–1200	1300
4	Платинородий (10 % Rh) – платина	ТПП(S)	0–1300	1600
5	Платинородий (30 % Rh) – платинородий (6 % Rh)	ТПР(В)	600–1700	1800
6	Вольфрамрений (5 % Re) – вольфрамрений (20 % Re)	ТВР(А)-1 ТВР(А)-2 ТВР(А)-3	0–2200 0–1800 0–1800	2500 2500 2500

Наиболее распространены в сварочном производстве хромель-копелевые и хромель-алюмелевые термопары. При условии кратковременного нагрева и надежной защиты термоэлектродов от воздействия газов эти термопары могут применяться для измерения высоких температур – до 1300 °С (температур расплавленных металлов).

Большое значение при конструировании термопреобразователей для измерения температуры расплавленных металлов (при необходимости измерения температуры сварочной ванны) имеет правильный выбор материала защитной арматуры. В связи с отсутствием материалов, длительно работающих в расплавленных металлах, используют специальные конструкции для кратковременного измерения (порядка нескольких секунд) температуры расплавленного металла.

### **Программа работы**

1. Ознакомиться с лабораторным оборудованием.
2. Измерить температуру кипящей дистиллированной воды хромель-алюмелевой и хромель-копелевой термопарой, подключенными к измерителям-регуляторам типа ТРМ1.
3. Определить относительную и абсолютную погрешность измерения температуры кипящей воды с использованием различных термопар.
4. Измерить температуру в процессе охлаждения расплавленного олова, свинца и алюминия различными термопарами, термосопротивлением и пирометром. Зафиксировать температуру плавления указанных металлов по показаниям различных приборов контроля температуры.
5. Определить относительную и абсолютную погрешность измерения температуры плавления указанных металлов с использованием различных приборов измерения.
6. Построить графики зависимости термо-ЭДС от температуры для хромель-алюмелевых и хромель-копелевых термопар.
7. Закрепить термопары ТХА и ТКХ на образце из углеродистой стали на одинаковом расстоянии от центра образца. Провести про-



цесс наплавки образца, фиксируя температуру образца с использованием термопар ТХА и ТКХ и оптического пирометра.

8. Построить график термического цикла сварки, используя различные средства измерения.

### **Оборудование и материалы**

Работа выполняется с использованием термической печи сопротивления ТК-27.1250.Н.1Ф с силовым блоком и регулятором температуры и колбонагревателем. Для измерения температуры расплава используются хромель-алюмелевые, хромель-копелевые термопары, термосопротивление ТРМ50, пирометр. Для наплавки образцов рекомендуется использовать сварочный аппарат «Форсаж-160АД», укомплектованный сварочной горелкой.

В качестве материалов для проведения работы рекомендуется использовать дистиллированную воду, свинец С (ГОСТ 3778–98), олово О (ГОСТ 860–75), алюминий А95 (ГОСТ 11069–2019). Плавку проводят в графитовых тиглях.

### **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Программа работы.
3. Описание лабораторного оборудования.
4. Методика и результаты исследований (таблица опытных и расчетных данных).
5. График зависимости термоэлектродвижущих сил от температуры для термопар ТКХ и ТХА.
6. Термический цикл сварки, полученный при использовании различных термопар и оптического пирометра.

### **Контрольные вопросы**

1. Что понимают под температурой вещества?
2. В каких величинах градуируют международную практическую шкалу?
3. Какие равновесные состояния определяются основными реперными точками по МПТМ-68?

4. Какие методы применяются для измерения температур веществ?
5. Какие методы измерения температур относятся к контактному?
6. Какие методы измерения температур относятся к бесконтактным?
7. Какие физические явления лежат в основе измерения температуры термометрами?
8. Какие типы термоэлектрических преобразователей применяются в промышленности?
9. Какие физические явления заложены в основу измерения температур термосопротивлением?
10. На каких явлениях основывается измерение температуры пирометром?
11. При исследовании тепловых процессов при сварке какие методы измерения температур чаще всего применяются?

### **Меры безопасности**

1. Работать с термическим и сварочным оборудованием только после осмотра и разрешения учебного мастера и под его руководством.

2. После включения сварочного оборудования запрещается касаться его токоведущих частей.

3. При исследовании тепловых процессов при сварке следует использовать сварочную маску с защитным стеклом, обеспечивающую защиту от излучения сварочной дуги.

4. После проведения исследования процессов сварки следует немедленно отключать сварочное оборудование.

## **Лабораторная работа 2**

### **Экспериментальные исследования процесса распределения тепла при сварке точечным источником тепла**

**Цель работы** – приобрести опыт и навыки экспериментального определения температуры в ходе нагрева и охлаждения при сварке точечным источником тепла.

#### **Краткие теоретические сведения**

##### **Процессы распространения тепла в бесконечном и полубесконечном теле при действии мгновенного точечного источника тепла**

Распространение теплоты существенно зависит от формы и размеров нагреваемого тела. Точно учесть сложную конфигурацию тела, анализируя процессы теплопереноса при сварке, достаточно сложно, а зачастую и невозможно. Для применения аналитических методов расчета необходимо упрощать формы рассматриваемых тел, сводя их к простейшим схемам.

В зависимости от формы и размеров свариваемого изделия, а также длительности процесса распространения теплоты выбирают одну из следующих схем нагреваемого тела.

1. Если границы тела не влияют на распространение теплоты, его можно заменить бесконечным (массивным) телом, имеющим неограниченную протяженность по всем направлениям декартовой системы координат  $Oxyz$  (рис. 2.1, *a*). Тепловой поток в этом случае пространственный, причем источник теплоты находится внутри тела.

2. Полубесконечное тело представляет собой массивное тело с одной ограничивающей плоскостью  $z = 0$  (рис. 2.1, *b*), на которой действует источник теплоты. Остальные ограничивающие поверхности тела находятся на значительном удалении и практически не влияют на распространение теплоты. Ошибка от пренебрежения ограниченностью размеров области распространения тепла тем меньше, чем больше размеры тела, чем короче расчетная продолжительность процесса распространения тепла, чем ближе к источнику тепла расчетная область, чем меньше значение коэффициента температуропроводности материала тела.

3. Плоский слой представляет собой тело, ограниченное двумя параллельными плоскостями:  $z = 0$  и  $z = \delta$  (рис. 2.1, *д*), в котором температура по толщине распределена равномерно. Эту схему применяют в тех случаях, когда толщина изделия не настолько велика, чтобы можно было пренебречь влиянием ограничивающей плоскости  $z = \delta$  и считать тело полубесконечным.

4. Бесконечная пластина представляет собой тело, ограниченное двумя параллельными плоскостями:  $z = 0$  и  $z = \delta$  (рис. 2.1, *в*). При использовании этой схемы полагают, что температура по толщине изделия распределена равномерно. Ошибка в расчетах от такого допущения тем меньше, чем меньше толщина изделия, чем больше продолжительность процесса, чем меньше коэффициент температуропроводности материала, чем дальше от источника теплоты расположена расчетная зона и чем меньше коэффициент поверхностной теплоотдачи.

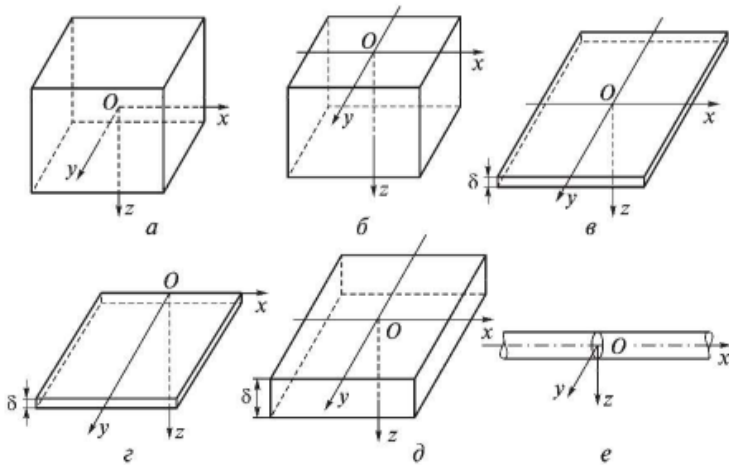


Рис. 2.1. Расчетные схемы тел:

- a* – бесконечное тело; *б* – полубесконечное тело;
- в* – бесконечная пластина; *з* – полубесконечная пластина;
- д* – плоский слой; *е* – бесконечный стержень

5. Бесконечный стержень представляет собой тело с прямой или криволинейной осью; распределение температуры в поперечном сечении стержня считается равномерным (рис. 2.1, *е*). Тепловой поток в этом случае линейный – вдоль оси стержня.



Ошибка от замены реального изделия с пространственным тепловым потоком схемой бесконечного стержня тем меньше, чем меньше поперечные размеры изделия, чем больше длительность процесса и коэффициент температуропроводности материала и чем меньше его коэффициент поверхностной теплоотдачи.

Следует отметить, что приведенная схематизация в определенной степени условна и только четкое понимание физической модели процесса позволяет наиболее правильно выбрать соответствующую расчетную схему. Основным критерием при выборе расчетной схемы должен служить ожидаемый вид теплового потока — пространственный, плоский или линейный.

Разнообразие применяемых источников теплоты обусловило необходимость и их схематизации. При проведении инженерных расчетов реальные сварочные источники теплоты заменяют схематизированными: точечными, линейными, плоскими.

При принятии схемы точечного источника допускается, что вводимая в изделие теплота сосредоточена в бесконечно малом объеме (точке). Обычно данную схему применяют в сочетании с расчетной схемой массивного тела или плоского слоя.

В случае принятия схемы линейного источника полагают, что вводимая в изделие теплота распределена по отрезку линии, длина которого чаще всего равна толщине изделия. Линейные источники обычно применяют для расчетных схем пластин, а также в виде источников ограниченной ширины для схем массивного тела или плоского слоя.

При использовании схемы плоского источника обычно предполагается равномерное распределение вводимой теплоты по сечению стержня. Такая схема применяется, например, для расчета температурного поля при контактной стыковой сварке стержней.

Применение схем сосредоточенных источников допустимо при расчете температур точек, удаленных от центра пятна нагрева на расстояние более  $0,7$  его диаметра.

По длительности выделения теплоты источники подразделяются на мгновенные (время действия стремится к нулю) и непрерывно действующие, которые могут быть неподвижными, подвижными и быстродвижущимися.

### 1. Точечный мгновенный неподвижный источник тепла в бесконечном теле

Границы бесконечного тела не влияют на распределение тепла, отсюда граничные условия можно не задавать. В начальный момент времени температура тела во всем его объеме равна нулю, тогда решение дифференциального уравнения теплопроводности примет вид:

$$T(R, t) = \frac{Q}{c\gamma(4\pi at)^{3/2}} \exp\left(-\frac{R^2}{4at}\right), \quad (2.1)$$

где  $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$  – расстояние от рассматриваемой точки до начала координат, в котором действует источник тепла;  $Q$  – количество тепла, введенного в тело источником;  $t$  – время, отсчитываемое с момента введения тепла;  $\frac{Q}{c\gamma(4\pi at)^{3/2}}$  – характеризует убывание тепла в точке  $R = 0$ ;  $\exp\left(-\frac{R^2}{4at}\right)$  – показывает, как убывает тепло по мере увеличения  $R$ .

В зависимости от температуры тела  $\exp$  изменяется от 0 до 1 (рис. 2.2):

$$\exp(-x) = e^{-x}.$$

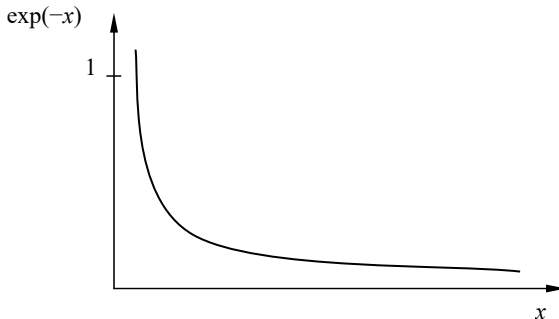


Рис. 2.2. Зависимость  $\exp(-x)$  от  $x$

Отрицательное значение показывает, что температура любой точки тела будет меньше, чем температура в точке приложения источника тепла. Изотермические поверхности от точечного источника тепла – сферы.

### Анализ решения уравнения (2.1)

Рассмотрим значение температуры в зависимости от  $R$  и  $t$ .

1. Принимаем  $R = 0, t = 0$ , т. е.  $T(0, 0) = \infty$ . Получается в начальный момент времени, когда в точке  $R = 0$  приложен источник тепла,  $T = \infty$ . Физически это невозможно. Это следствие допущения о точечном источнике. Чем дальше рассматриваемая точка от источника тепла, тем точнее расчетная температура.

2.  $R \neq 0, t = 0, T(R, 0) = 0$ . Температура любой точки, кроме точки  $R = 0$ , будет равна нулю. Физически это означает, что тепло не успело распространиться.

3.  $R = 0, t \neq 0, T(0, t) = \frac{Q}{\gamma(4\pi\alpha t)^{3/2}}$ . Температура точки приложения тепла в любой момент времени, кроме  $t = 0$ , является конечной.

4.  $R \neq 0, t \neq 0$ , тогда температура – конечная величина, отличная от нуля в любой точке в любой момент времени.

5.  $R = \infty, t \neq 0, T(\infty, t) = 0$ . По мере удаления от точки действия источника тепла температура будет уменьшаться до 0 на бесконечно большом расстоянии от этой точки.

6.  $R \neq 0, t = \infty, T(R, \infty) = 0$ . Температура любой точки уменьшится до нуля через бесконечно большой промежуток времени.

Анализ дает возможность наглядно представить распределение тепла в теле (рис. 2.3).

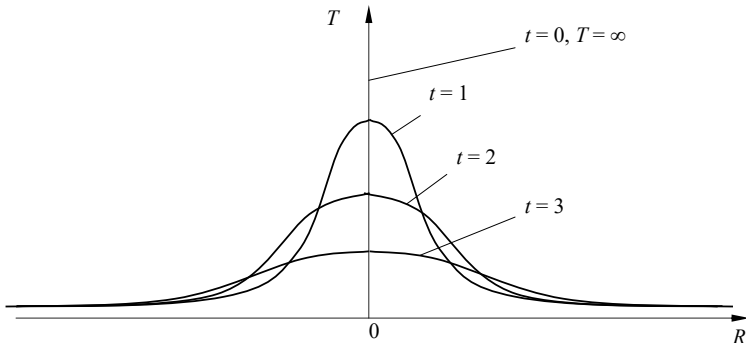


Рис. 2.3. Распределение температуры от точечного источника теплоты, действующего в бесконечном теле

Если  $R = 0$ ,  $t = 0$ , то кривая изменения температуры совпадает с осью  $T$ .

Если  $t = 1$ , то при  $R = 0$  температура получает конечное значение.

При  $R$ , стремящемся к бесконечности, температура будет уменьшаться до нуля. Чаще всего эти кривые изображаются близкими к нормальному закону распределения.

Если учитывать экспоненциальное значение второго сомножителя, видно, что чем больше  $R$ , тем медленнее будет уменьшаться температура от максимального значения. С течением времени температура будет уменьшаться в точке, где действовал источник, и увеличиваться в окрестностях этой точки, пока не произойдет выравнивание температуры во всем теле.

Изменение температуры данной точки во времени будет называться термическим циклом (рис. 2.4).

Из кривых видно, что процесс нагрева идет быстрее, чем охлаждение. Чем дальше рассматриваемая точка от источника тепла, тем позднее она достигнет максимальной температуры и тем меньше значение этой максимальной температуры.

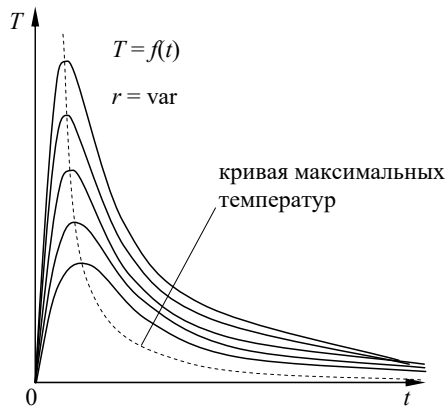


Рис. 2.4. Термический цикл сварки



Основными параметрами термического цикла сварки являются (рис. 2.5):

- максимальная температура нагрева  $T_{\max}$ , °C;
- мгновенная скорость нагрева  $w_{\text{н}}$  и скорость охлаждения  $w_{\text{охл}}$ , °C/c;
- длительность пребывания металла выше некоторой температуры  $T_i - t_{\text{н}}$ , с: при нагреве ( $t'$ ) и при охлаждении ( $t''$ );
- скорость охлаждения в интервале температур, °C/c.

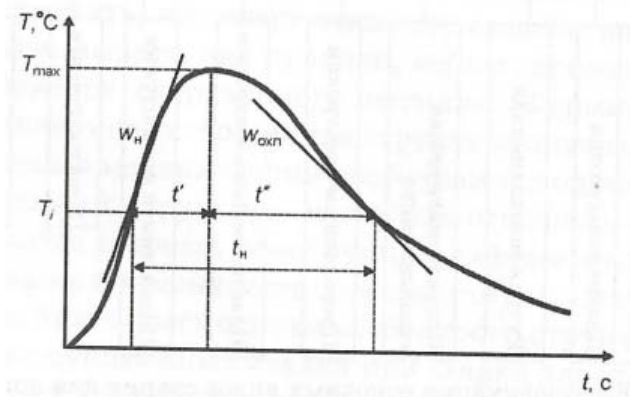


Рис. 2.5. Термический цикл сварки и его основные параметры [5]

## 2. Точечный мгновенный неподвижный источник тепла в полубесконечном теле

Граничные условия:  $T_s = 0$ ,  $q_s = 0$  (пренебрегаем теплоотдачей с поверхности тела). Всё тепло будет идти в одну сторону, каждая точка будет получать в 2 раза больше тепла, чем в предыдущем случае.

$$T(R, t) = \frac{2Q}{c\gamma(4\pi at)^{3/2}} \exp\left(-\frac{R^2}{at}\right). \quad (2.2)$$

Изотермические поверхности — полусферы.

## Программа работы

1. Получить у лаборанта образец — пластины из стали 20 для исследования термического цикла сварки, термопары и оборудование для сварки термопар.

2. Ознакомиться со сварочным постом и оснасткой. Источники питания должны обеспечивать сварку на постоянном токе прямой полярности.

3. Подготовить образец — пластину для проведения эксперимента. Внешнюю поверхность образца зачистить до металлического блеска и найти центр пластины.

4. Закрепить 3 термопары на различном расстоянии от центра пластины и соединить их с измерителем тепловых полей. Образец положить и закрепить на рабочем столе.

5. Установить сварочный ток на панели сварочного источника в диапазоне 50–150 А.

6. При проведении экспериментов измерять температуру с частотой 0,1 Гц при постоянных значениях силы тока. Время процесса сварки выбирать постоянным. В ходе сварки контролировать действительные значения тока и напряжения.

7. После остывания пластины ниже 50 °С отключить термопары от прибора и удалить их с образца. Замерить диаметр сварочной ванны с помощью штангенциркуля.

8. Пользуясь формулой (2.2), рассчитать изменение температуры точек закрепления термопар с учетом действительных значений тока и напряжения при сварке и теплофизических свойств стали.

9. Построить и сравнить экспериментальные и расчетные термические циклы для 3 точек закрепления термопары. Построить линии максимальных температур.

10. Построить экспериментальные и расчетные графики распределения максимальных температур в зависимости от расстояния до центра действия источника тепла.

11. Построить изотермы максимальных температур. Учитывая, что изотерма 1539 °С соответствует линии сплавления, определить радиус изотермы с температурой эвтектоидного распада аустенита в стали (727 °С) и построить ее.

12. Определить скорость нагрева металла в интервале температур аустенитного превращения (727–911 °С) и скорость охлаждения в этом интервале.

13. Определить время пребывания металла выше температуры 727 °С.

### Описание лабораторной установки и перечень необходимых материалов

Для измерения и регистрации тепловых полей при аргонодуговой сварке используется специально разработанная и изготовленная установка. С данным комплексом оборудования возможно задавать скорость сварки, длину наплавленного сварочного валика, а также формировать точечную сварку с заданием длительности горения сварочной дуги. Для регистрации температур используются термопары хромель – алюмель (ТХА).

Блочная схема оборудования изображена на рис. 2.6.

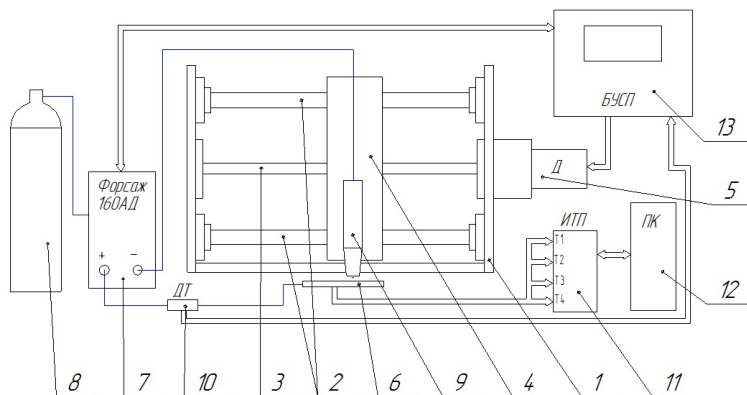


Рис. 2.6. Блочная схема установки по измерению тепловых полей:  
1 – станина; 2 – линейные направляющие; 3 – трапециевидный винт;  
4 – поперечный портал; 5 – привод перемещения горелки; 6 – образец для наплавки; 7 – сварочный источник; 8 – баллон с аргоном;  
9 – аргонодуговая горелка с неплавящимся электродом; 10 – датчик тока;  
11 – измеритель тепловых полей; 12 – персональный компьютер;  
13 – блок управления сварочным процессом

Внешний вид стенда показан на рис. 2.7. Основными узлами являются поперечный портал с кареткой, на которой установлена аргонодуговая горелка с неплавящимся вольфрамовым электродом и программным блоком для задания режимов.



Рис. 2.7. Внешний вид установки

Для формирования сварочной дуги используется сварочный аппарат «Форсаж-160АД». Регулировка сварочного тока производится непосредственно с передней панели аппарата (рис. 2.8). В качестве защитного газа используется аргон. В качестве сварочной горелки используется горелка Abikor Binzel.

#### Технические характеристики

Электропитание, В	Однофазная сеть 220 В 50 Гц
Основной режим работы	TIG
Дополнительные режимы работы	MMA
Диаметр электрода, мм	1,6–4
Диапазон регулирования сварочного тока, А	
– режим TIG	25–160
– режим MMA	25–160
Напряжение холостого хода, В в активном режиме	70–100
Процент нагрузки, % при сварочном токе 160 А	100
Максимальная мощность сети питания, кВА	8

Зажигание дуги	Бесконтактное/контактное
Регулируемое время нарастания/спада тока	+
Регулируемая продувка газа	+
Габариты, мм	440×200×410
Масса, кг	16
Рабочий диапазон температуры окружающей среды, °С	-20 – +40



Рис. 2.8. Сварочный источник «Форсаж-160АД»

Основные режимы наплавки задаются на программном блоке. Для визуализации тепловых полей при наплавке на блоке управления имеется возможность подключения до четырех термопар типа ТХА.

Блок управления сварочным процессом (БУСП) состоит из процессорного модуля, собранного на процессоре Arduino Mega, четырехстрочного жидкокристаллического индикатора, матричной клавиатуры и четырех адаптеров для преобразования сигнала термопары в цифровое значение температуры. Arduino Mega построена на микроконтроллере ATmega2560.

Плата имеет 54 цифровых входа/выхода (14 из которых могут использоваться как выходы ШИМ), 16 аналоговых входов, 4 последовательных порта UART, кварцевый генератор 16 МГц, USB-коннектор, разъем питания, разъем ICSP и кнопку перезагрузки. Для работы необходимо подключить платформу к компьютеру посредством кабеля USB.

### Краткие характеристики

Микроконтроллер	ATmega2560
Рабочее напряжение	5 В
Входное напряжение (рекомендуемое)	7–12 В
Входное напряжение (предельное)	6–20 В
Цифровые входы/выходы	54 (14 из которых могут работать также как выходы ШИМ)
Аналоговые входы	16
Постоянный ток через вход/выход	40 mA
Постоянный ток для вывода 3,3 В	50 mA
Флеш-память	256 КВ (из которых 8 КВ используются для загрузчика)
ОЗУ	8 КВ
Энергонезависимая память	4 КВ
Тактовая частота	16 МГц

Для регистрации с последующей записью в персональный компьютер и обработки данных в Excel следует использовать специализированный блок.

С учетом разработанной установки порядок ее работы следующий.

После включения питания на экране появляется главное меню с предложением выбора режима работы:

**SETUP OF THE MODE**  
**Automatic mode F1**  
**Manual mode F2**

F1 – работа в автоматическом режиме.

F2 – работа в ручном режиме.

#### Ручной режим

При выборе ручного режима на экране появляется окно:

**Manual mode drive:**  
← – to the left  
→ – to the right

Нажатием на клавиатуре стрелки влево или вправо каретка с горелкой должна перемещаться в соответствующее направление.

Нажатие на кнопку «#» приводит к включению сварочного аппарата. При этом происходит включение клапана подачи защитного газа и появление напряжения холостого хода. Возбуждение сварочной дуги осуществляется **только графитовым электродом**.

Выключение сварочной дуги осуществляется повторным нажатием на клавиатуре кнопки «#».

При нажатии на кнопку «\*» появляется следующее окно:

<p><b>IN 1 – 100 °C Voltage</b> <b>IN 2 – 150 °C output:</b> <b>IN 3 – 200 °C 12.5</b> <b>IN 4 – 250 °C Volt</b></p>
--

Справа выводятся значения четырех температур с термопар, а слева – значение напряжения на дуге. Закрытие данного окна производится путем повторного нажатия на кнопку «\*».

#### **Автоматический режим**

При выборе автоматического режима из главного меню, кнопка «F1» на клавиатуре, появляется следующее меню:

<p><b>1 – Automatic on speed</b> <b>2 – Automatic on time</b></p>
---

1 – процесс наплавки будет происходить при заданной скорости и заданной длине сварочного шва.

2 – процесс наплавки будет происходить при заданном временном интервале сварочной точки.

#### **Процесс наплавки с заданной скоростью и заданной длиной сварочного шва**

При нажатии на клавиатуре «1» появляется меню для ввода скорости сварки и ввода длины сварочного валика:

<p><b>Traverse speed</b> <b>0 mm/sec</b> <b>Relocation distance</b> <b>0 mm.</b></p>
--



Вводим значение скорости сварки, например, скорость сварки будет 5 мм/с, и нажимаем кнопку на клавиатуре «↑». Значение скорости должно отобразиться в графе скорости на экране. Далее вводим длину сварочного шва, например 70, и нажимаем кнопку на клавиатуре «↓». Значение длины должно появиться в соответствующей графе на экране:

<p style="text-align: center;"><b>Traverse speed</b> <b>5 mm/sec</b> <b>Relocation distance</b> <b>70 mm.</b></p>
---

После ввода необходимых параметров включаем процесс наплавки путем нажатия кнопки «ENT». Происходит включение клапана подачи защитного газа и появление напряжения холостого хода. Возбуждение сварочной дуги осуществляется **только графитовым электродом**. После возбуждения дуги автоматически пойдет процесс наплавки с заданной скоростью и на заданную длину сварочного шва. После окончания прохождения заданной длины блок управления даст команду на отключение сварочной дуги.

#### **Процесс наплавки с заданным временным интервалом сварочной точки**

При нажатии на клавиатуре «2» появляется экран для ввода времени длительности сварочной точки:

<p style="text-align: center;"><b>Automatic on time</b> <b>Arc time sek.</b> <b>Voltage volt</b></p>
--

С клавиатуры вводим значение времени и подтверждаем введенное значение кнопкой «ENT». Происходит включение клапана подачи защитного газа и появление напряжения холостого хода. Возбуждение сварочной дуги осуществляется **только графитовым электродом**. После возбуждения дуги автоматически пойдет отсчет заданного временного интервала. После окончания заданного временного интервала блок управления даст команду на отключение сварочной дуги.

### Технические характеристики

Напряжение питания	220 В
Потребляемая мощность	20 кВа
Сварочный ток	15–160 А
Защитный газ	Аргон
Скорость сварки	1–20 мм/с
Диапазон сварочной точки	1–300 с
Тип термопар	ТХА

### Материалы

1. Три пластины из малоуглеродистой стали.
2. Вольфрамовый электрод.
3. Термопары типа хромель – алюмель или хромель – копель диаметром 0,1–0,5 мм.
4. Компенсационные провода, выполненные из одного материала, входящего в состав термопары. Рабочая часть термопары должна быть не меньше 200 мм. Длина компенсационного провода выбирается по месту.

### Содержание отчета

1. Цель работы и задание.
2. Программа работы.
3. Результаты исследований в виде таблиц, опытных данных и графиков.
4. Выводы по работе с их логическим обоснованием.
5. Поясняющие рисунки и схемы.

### Вопросы для самоконтроля

1. Что понимается под термином «термический цикл сварки»?
2. Какие допущения и почему приняты в классической теории распространения теплоты при сварке?
3. Какие основные схемы нагреваемого тела применяются в классической теории распространения тепла при сварке?
4. Охарактеризуйте схему нагреваемого тела при сварке: *бесконечное тело*.

5. Охарактеризуйте схему нагреваемого тела при сварке: *полубесконечное тело*.
6. Охарактеризуйте схему нагреваемого тела при сварке: *плоский слой*.
7. Охарактеризуйте схему нагреваемого тела при сварке: *бесконечный стержень*.
8. Охарактеризуйте схему нагреваемого тела при сварке: *бесконечная пластина*.
9. Какой вид имеет решение дифференциального уравнения теплопроводности при действии мгновенного точечного источника тепла в бесконечном теле?
10. Какой вид имеет решение дифференциального уравнения теплопроводности при действии мгновенного точечного источника тепла в полубесконечном теле?
11. Что показывает кривая максимальных температур при сварке?
12. Как можно определить кривую максимальных температур при сварке?
13. Как можно определить скорость нагрева и охлаждения металла при сварке, пользуясь графиком термического цикла при сварке?
14. Как можно определить время пребывания металла выше некоторой температуры, пользуясь графиком термического цикла при сварке?

### **Меры безопасности**

1. Работать со сварочным оборудованием только после осмотра и разрешения учебного мастера и под его руководством.

2. После включения сварочного оборудования запрещается касаться его токоведущих частей.

3. При исследовании тепловых процессов при сварке следует использовать сварочную маску с защитным стеклом, обеспечивающую защиту от излучения сварочной дуги.

4. После проведения исследования процессов сварки следует немедленно отключать сварочное оборудование.

5. Замеры геометрических параметров сварочной точки проводить только после охлаждения образца до комнатной температуры.

### Лабораторная работа 3

## Исследование влияния режимов сварки плавлением на температурное поле

**Цель работы** — приобрести навыки исследования влияния режимов сварки на распределение температур при действии точечного непрерывно движущегося источника тепла на поверхности полубесконечного тела.

### Краткие теоретические сведения

#### Точечный непрерывно движущийся источник тепла в полубесконечном теле

Весь период действия непрерывного источника тепла разбивают на бесконечно малые отрезки  $dt$ . Источник в течение этого элементарного времени считают мгновенным. Затем суммируют решения для всех мгновенных источников за время от  $t = 0$  до  $t = n$  и получают температурное поле от непрерывного источника. Распределенный источник по принципу наложения рассматривают как сумму сосредоточенных источников.

Схема к расчету температурных полей от подвижного источника представлена на рис. 3.1.

Граничные условия:  $T_s = 0, q_s = 0$ .

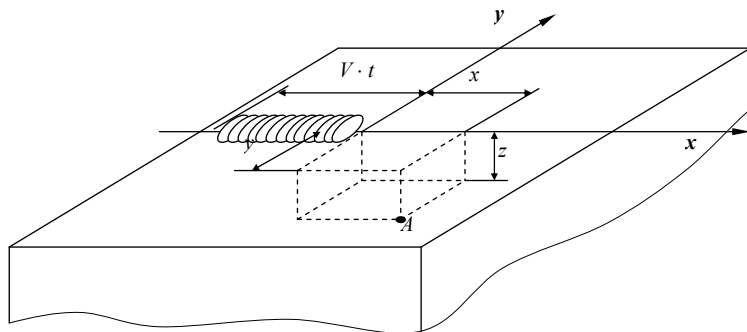


Рис. 3.1. Схема к расчету температурных полей от подвижных источников [5]

Решение для квазистационарного поля имеет вид:

$$T(R, x) = \frac{q}{2\pi\lambda R} \exp\left(-\frac{V}{2a}(R+x)\right), \quad (3.1)$$

где  $q$  – эффективная тепловая мощность движущегося источника;  $V$  – скорость движения источника;  $x$  – абсцисса рассматриваемой точки;  $R$  – расстояние от рассматриваемой точки до источника тепла, движущегося вместе с началом координат.

Если  $V = 0$ , то  $\exp(0) = 1$ .

$$T(R) = \frac{q}{2\pi\lambda R}. \quad (3.2)$$

Это значит, что при неподвижном точечном непрерывном источнике температура предельного состояния при заданной мощности  $q$  и при данном металле будет зависеть только от  $R$ , т. е. от расстояния от рассматриваемой точки до источника.

Рассмотрим влияние скорости на распределение температуры вдоль оси  $x$ . Примем позади источника  $x < 0$ , тогда  $R = -x$ , и из уравнения (3.1) снова получим уравнение (3.2). Это физически означает, что распределение температуры позади движущегося по поверхности полубесконечного тела точечного источника одинаково при любой скорости и будет так же максимально, как при предельном состоянии от неподвижного источника.

Впереди источника  $x > 0$ ,  $R = x$ :

$$T(R, x) = \frac{q}{2\pi\lambda x} \exp\left(-\frac{Vx}{a}\right). \quad (3.3)$$

Так как  $\exp\left(-\frac{Vx}{a}\right) < 1$ , то чем быстрее движется источник или чем меньше теплопроводность металла, тем резче убывает температура впереди источника. Физически это означает, что с изменением скорости и температуропроводности изменяется соотношение атомно-молекулярного и конвективного процесса переноса тепла. Рассмотрим  $T(x)$  при различных значениях скоростей сварки:

$$V_1 < V_2 < V_3.$$

Очевидно, что при точечном непрерывном источнике на поверхности полубесконечного тела длина хвостовой части ванны не

зависит от скорости сварки, а длина головной части и общая длина ванны, а также ее объем увеличиваются с уменьшением  $V_{cb}$  и уменьшаются с ее повышением.

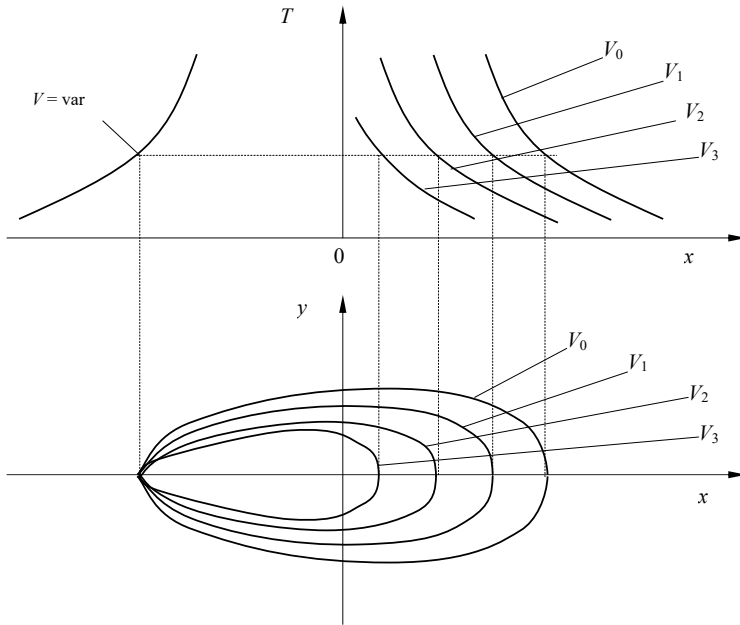


Рис. 3.2. Распределение температуры от точечного движущегося источника теплоты, действующего в полубесконечном теле

Рассмотрим распределение температур по оси  $y$  при  $x = 0$ . Тогда получаем:

$$T(R) = \frac{q}{2\pi\lambda R} \exp\left(-\frac{VR}{2a}\right). \quad (3.4)$$

Температура по оси  $y$  будет зависеть от скорости сварки. Так как  $\exp\left(-\frac{VR}{2a}\right) > \exp\left(-\frac{Vx}{2a}\right)$ , то температура будет убывать медленнее, чем по оси  $x$ .

## Программа работы

1. Получить у лаборанта образец — пластину из низкоуглеродистой стали для исследования термического цикла сварки, термопары и оборудование для сварки термопар.

2. Ознакомиться со сварочным постом и оснасткой. Источники питания должны обеспечивать сварку на постоянном токе прямой полярности.

3. Подготовить свариваемые образцы — пластинки толщиной 10–20 мм для эксперимента. Внешнюю поверхность образца зачистить до металлического блеска и найти центр пластины.

4. Закрепить четыре термопары на пластинах: две параллельно шву и две перпендикулярно на различном расстоянии от центра пластины, и соединить их с измерителем тепловых полей. Образец положить и закрепить на рабочем столе.

5. Установить сварочный ток на панели сварочного источника на отметке 150 А и скорость сварки в диапазоне 0,1–0,5 м/мин.

6. При проведении экспериментов измерять температуру с частотой 0,1 Гц при постоянных значениях силы тока. В ходе проведения экспериментов силу тока выбирать постоянной — 150 А. Скорость сварки выбираем 0,1; 0,3; 0,5 м/мин. В процессе сварки фиксируем действительные значения силы тока и напряжения.

7. После остывания пластин ниже 50 °С отключить термопары от прибора и удалить их с образца. Замерить ширину сварочной ванны с помощью штангенциркуля. Построить экспериментальную зависимость ширины сварочной ванны от скорости сварки.

8. Построить термические циклы при различных режимах сварки для четырех точек закрепления термопары по измеренным показаниям и сравнить их. Построить линии максимальных температур при различных режимах сварки и изотермы со значениями максимальных температур, зафиксированных термопарами.

9. Пользуясь формулами (3.1)–(3.4), рассчитать предельные значения температур точек закрепления термопар с учетом действительных значений тока и напряжения при сварке и теплофизических свойств стали и сравнить эти значения с экспериментальными.



10. Учитывая, что изотерма 1539 °С соответствует линии сплавления, определить ширину изотермы с температурой эвтектоидного распада аустенита в стали (727 °С) при различных условиях сварки, построить изотермы и сравнить их.

11. Рассчитать критерий Пекле и определить, движущийся или быстро движущийся источник тепла применялся при сварке.

### **Описание лабораторной установки и перечень необходимых материалов**

Для измерения и регистрации тепловых полей при аргонодуговой сварке используется специально разработанная и изготовленная установка (рис. 2.6, 2.7).

### **Материалы**

1. Три пластины из малоуглеродистой стали.
2. Вольфрамовый электрод.
3. Термопары типа хромель – алюмель диаметром 0,1–0,5 мм.
4. Компенсационные провода, выполненные из одного материала, входящего в состав термопары. Длина компенсационного провода выбирается по месту.

### **Содержание отчета**

1. Цель работы и задание.
2. Программа работы.
3. Результаты исследований в виде таблиц опытных данных и графиков.
4. Выводы по работе с их логическим обоснованием.
5. Поясняющие рисунки и схемы.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Что такое температурное поле, изотермическая поверхность, градиент температуры?
2. В чем сущность принципа наложения (суперпозиции) при расчетах температурных полей?
3. Покажите схему к расчету температурных полей от подвижного источника тепла.

4. Составьте уравнение распространения тепла в полубесконечном теле от точечного движущегося источника теплоты.
5. Составьте уравнение распространения тепла в бесконечной пластине от движущегося линейного непрерывно действующего источника тепла постоянной мощности.
6. Составьте уравнение распространения тепла в бесконечном стержне от подвижного плоского источника.
7. Как изменяется температура позади движущегося по поверхности полубесконечного тела точечного источника?
8. Как изменяется температура впереди движущегося по поверхности полубесконечного тела точечного источника в зависимости от скорости сварки?
9. Как изменяется размер хвостовой части сварочной ванны при сварке и наплавке массивных плоских изделий при увеличении скорости сварки?
10. Как изменяется размер головной части сварочной ванны при сварке и наплавке массивных плоских изделий при увеличении скорости сварки?
11. В чем отличия быстродвижущегося линейного источника тепла в пластине от движущегося?
12. Какой безразмерный критерий применяется для оценки характера движения распределенного источника?

### **Меры безопасности**

1. Работать со сварочным оборудованием только после осмотра и разрешения учебного мастера и под его руководством.
2. После включения сварочного оборудования запрещается касаться его токоведущих частей.
3. При исследовании тепловых процессов при сварке следует использовать сварочную маску с защитным стеклом, обеспечивающую защиту от излучения сварочной дуги.
4. После проведения исследования процессов сварки следует немедленно отключать сварочное оборудование.
5. Замеры геометрических параметров сварочного шва проводить только после охлаждения образца до комнатной температуры.

## **Лабораторная работа 4**

### **Экспериментальные и расчетные исследования влияния режимов сварки и теплофизических свойств основного металла на размеры сварочной ванны**

**Цель работы** – ознакомиться с методиками экспериментальных и расчетных исследований влияния режимов сварки и теплофизических свойств основного металла на размеры сварочной ванны.

#### **Краткие теоретические сведения**

##### **Форма и размеры сварочной ванны**

Плавление основного металла при сварке осуществляется с целью соединения между собой свариваемых деталей. Идеальным в отношении затрат теплоты представляется такое тепловыделение в источнике, при котором обеспечивается минимальная глубина проплавления сопрягаемых поверхностей, а присадочный металл не используется вовсе или входит в соединение в минимальном объеме.

При использовании дуговых, плазменных и газопламенных источников теплоты при сварке встык листов металла небольшой толщины форма ванны близка к форме изотермы, которая соответствует температуре плавления, рассчитанной для схемы движущегося линейного источника в пластине. С ростом толщины листов металла разница в размерах ванны на верхней и нижней поверхностях листа становится все более значительной, а при определенной толщине полное проплавление уже не достигается, как показано на рис. 4.1. Для увеличения проплавляющей способности указанных источников используют разделку кромок. Проплавляющую способность различных источников теплоты обычно оценивают экспериментальным путем, расплавляя поверхность массивного тела или толстой пластины.

Геометрические размеры сварочной ванны и валика шва характеризуются следующими параметрами (рис. 4.1):  $L$  – длина ванны;  $B$  – ширина ванны;  $H$  – глубина проплавления;  $H_k$  – глубина кратера;  $A$  – высота выпуклости шва;  $F_{пр}$  – площадь проплавления;  $F_n$  – площадь наплавки. Форму зоны проплавления оценивают относительной глубиной проплавления  $H / B$  или коэффициентом формы

провара  $\Psi_{\text{пр}} = B / H$ , а также коэффициентом полноты проплавления  $\mu_{\text{пр}} = F_{\text{пр}} / (HB)$ , значение которого обычно составляет 0,6–0,8.

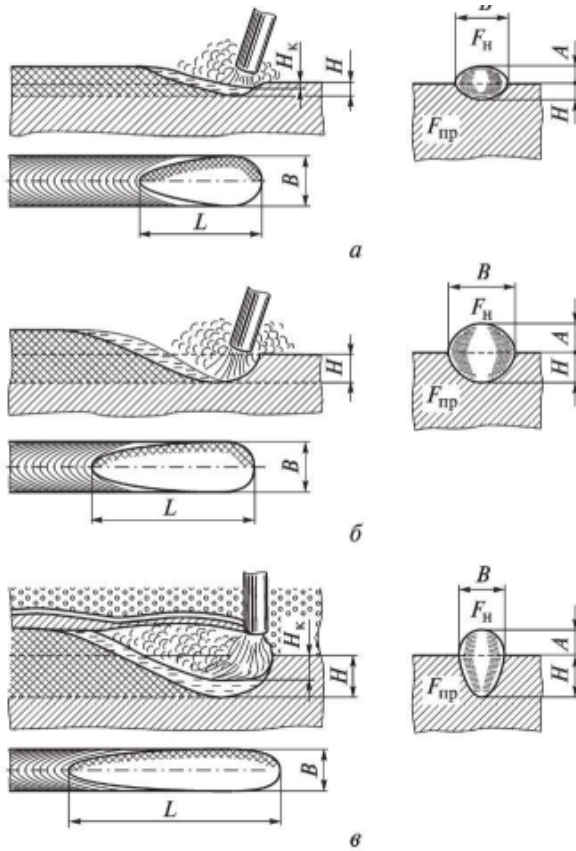


Рис. 4.1. Формы сварочной ванны при дуговой сварке:  
 а – поверхностная дуга; б – погруженная дуга; в – дуга под флюсом [5]

Для дуговых видов сварки относительная глубина проплавления  $H / B$  достигает максимального значения  $\approx 3$  (сварка под флюсом). Очертания зоны наплавки характеризуются коэффициентом формы валика  $\Psi_{\text{в}} = B / A$  и коэффициентом полноты валика  $\mu_{\text{в}} = F_{\text{н}} / (AB)$ .

Теоретически очертание ванны расплавленного металла соответствует очертанию изотермической поверхности, соответствующей температуре плавления  $T_{\text{пл}}$ . Однако в известных расчетных

схемах не учитываются: распределенный характер источника теплоты, наличие зазора и разделки кромок, давление дуги, движение металла в сварочной ванне, скрытая теплота плавления, переменные значения теплофизических свойств и др. Вследствие этого расчет позволяет оценить размеры ванны весьма приближенно.

Длина ванны  $L$  при наплавке валика на массивное тело может быть рассчитана по формуле при  $T = T_{\text{пл}}$ :

$$L = \frac{q}{2\pi\lambda(T_{\text{пл}} - T_{\text{н}})}. \quad (4.1)$$

Ширина ванны в предположении, что источник теплоты быстродвижущийся, может быть оценена с помощью выражения при  $T = T_{\text{пл}}$ :

$$B = \sqrt{\frac{8q/V}{\pi e c p (T_{\text{пл}} - T_{\text{н}})}}. \quad (4.2)$$

Площадь проплавления основного металла при наплавке валика на массивное тело можно определить как площадь, ограниченную в поперечном сечении линией максимальных температур, равных температуре плавления  $T_{\text{пл}}$ . Учитывая, что в поперечном сечении изотермы представляют собой полуокружности, запишем следующее выражение для площади проплавления:

$$F_{\text{пр}} = \pi \frac{r_{\text{пл}}^2}{2}. \quad (4.3)$$

Выражение для расчета максимальных температур с учетом (4.3) принимает вид:

$$T_{\text{м}}(r_{\text{пл}}) - T_{\text{н}} = \frac{2q}{\pi e c p r_{\text{пл}}^2} = \frac{q}{V e c p F_{\text{пр}}}. \quad (4.4)$$

Отсюда выразим  $F_{\text{пр}}$ , учитывая, что  $T_{\text{м}}(r_{\text{пл}}) = T_{\text{пл}}$ :

$$F_{\text{пр}} = \frac{q}{e c p (T_{\text{пл}} - T_{\text{н}})}. \quad (4.5)$$

## Программа работы

1. Получить у лаборанта образцы – пластины из низкоуглеродистой стали, алюминия и титана для исследования влияния режимов сварки на форму и размеры сварочной ванны.

2. Ознакомиться со сварочным постом и оснасткой. Источники питания должны обеспечивать сварку на постоянном токе прямой полярности.

3. Подготовить свариваемые образцы – пластинки толщиной 10–20 мм для эксперимента. Внешнюю поверхность образцов зачистить до металлического блеска. Образец положить и закрепить на рабочем столе.

4. Установить сварочный ток на панели сварочного источника в диапазоне 50–150 А и скорость сварки в диапазоне 0,1–0,5 м/мин.

5. Провести наплавку образцов, фиксируя действительные значения тока и напряжения. В ходе проведения экспериментов силу тока выбирать постоянной: 50 А; 100 А; 150 А. Скорость сварки выбираем 0,1; 0,3; 0,5 м/мин.

6. После охлаждения подготовить макрошлифы образцов в поперечном сечении. Измерить геометрические параметры наплавленного валика и занести их в таблицу. Исходя из геометрических параметров наплавленного шва, рассчитать площадь проплавления.

7. Построить зависимости геометрических параметров наплавленного шва от режимов сварки для различных металлов и сравнить их.

8. Пользуясь формулами (4.1)–(4.5), рассчитать длину ванны, ширину и площадь проплавления. Сравнить расчетные данные с экспериментальными.

### **Описание лабораторной установки и перечень необходимых материалов**

Для измерения и регистрации тепловых полей при аргонодуговой сварке используется специально разработанная и изготовленная установка (рис. 2.6, 2.7).

## **Материалы**

1. По 9 пластин из стали 20, алюминия А5 и титана ВТ1-0.
2. Вольфрамовый электрод.
3. Аргон высшего сорта по ГОСТ 10157–2016.

## **Содержание отчета**

1. Цель работы и задание.
2. Программа работы.
3. Результаты исследований в виде таблиц опытных данных и графиков.
4. Выводы по работе с их логическим обоснованием.
5. Поясняющие рисунки и схемы.

## **Вопросы для самоконтроля**

1. С какой целью проводят плавление основного металла при сварке?
2. Какую форму имеет сварочная ванна при электронно-лучевой сварке?
3. От чего зависит форма сварочной ванны при электрошлаковой сварке?
4. Какую форму имеет сварочная ванна при электродуговой сварке листов небольшой толщины?
5. Как оценивается проплавливающая способность различных источников теплоты?
6. Каковы основные геометрические параметры сварочной ванны и валика шва?
7. Как оценивается относительная глубина проплавления и коэффициент формы провара?
8. Как рассчитывается коэффициент полноты проплавления?
9. Какими коэффициентами оценивается очертание зоны наплавки?
10. Укажите формулу для расчета длины сварочной ванны при наплавке валика на массивное тело.



11. Укажите формулу для расчета ширины сварочной ванны при наплавке валика на массивное тело.
12. Укажите формулу для расчета площади проплавления при наплавке валика на массивное тело.

### **Меры безопасности**

1. Работать со сварочным оборудованием только после осмотра и разрешения учебного мастера и под его руководством.
2. После включения сварочного оборудования запрещается касаться его токоведущих частей.
3. При исследовании тепловых процессов при сварке следует использовать сварочную маску с защитным стеклом, обеспечивающую защиту от излучения сварочной дуги.
4. После проведения исследования процессов сварки следует немедленно отключать сварочное оборудование.
5. Замеры геометрических параметров наплавленного валика проводить только после охлаждения образца до комнатной температуры.

## Рекомендуемая литература

1. Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке : [учеб. пособие для машиностроительных вузов] / Н. Н. Рыкалин. — Москва : Машгиз, 1951. — 296 с.
2. Рыкалин, Н. Н. Пространственное распределение температуры при дуговой сварке : [монография] / Н. Н. Рыкалин. — Москва [и др.] : Изд-во Академии наук СССР, 1941. — 52, [4] с.
3. Теория сварочных процессов : учебник / В. Н. Волченко, В. М. Ямпольский, В. А. Винокуров, В. В. Фролов ; под ред. В. В. Фролова. — Москва : Высшая школа, 1988. — 558, [1] с.
4. 50 лет высшему сварочному образованию в Тольятти : очерки / В. В. Масаков, Г. М. Короткова, Р. А. Цепенев, М. Д. Банов ; Тольяттинский государственный университет. — Тольятти : Изд-во ТГУ, 2013. — 247 с.
5. Теория сварочных процессов : учебник / В. М. Неровный, А. В. Коновалов, Б. Ф. Якушин [и др.] ; под ред. В. М. Неровного. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. — 702, [1] с.
6. Березовский, Б. М. Математические модели дуговой сварки. Том 1. Математическое моделирование и информационные технологии, модели сварочной ванны и формирования шва / Б. М. Березовский ; Южно-Уральский государственный университет. — Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2002. — 584 с.
7. Березовский, Б. М. Математические модели дуговой сварки. Том 2. Математическое моделирование и оптимизация формирования различных типов сварных швов / Б. М. Березовский ; Южно-Уральский государственный университет. — Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2003. — 601 с.
8. Березовский, Б. М. Математические модели дуговой сварки. Том 3. Давление дуги, дефекты сварных швов, перенос электродного металла / Б. М. Березовский ; Южно-Уральский государственный университет. — Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2003. — 484, [1] с.

9. Кархин, В. А. Тепловые процессы при сварке / В. А. Кархин. — 2-е изд. — Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического университета, 2015. — 571 с.
10. Зорин, Н. Е. Материаловедение сварки. Сварка плавлением : учеб. пособие / Н. Е. Зорин, Е. Е. Зорин. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2016. — 163, [1] с.
11. Технология и оборудование сварки плавлением : лабораторный практикум / В. П. Сидоров, К. В. Моторин, Г. М. Короткова [и др.] ; под ред. В. П. Сидорова, К. В. Моторина ; Тольяттинский государственный университет. — Тольятти : Изд-во ТГУ, 2017. — 392 с.
12. Линевег, Ф. Измерение температур в технике : справочник / Ф. Линевег ; пер. с нем. Т. И. Киселевой, В. А. Федоровича. — Москва : Металлургия, 1980. — 543 с.