

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
Тольяттинский государственный университет  
Институт машиностроения  
(наименование института полностью)  
Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные  
процессы»  
(наименование кафедры)  
22.04.01 Материаловедение и технологии материалов  
(код и наименование направления подготовки)  
«Сварка и пайка новых металлических и неметаллических  
неорганических материалов»  
(наименование (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему: Разработка методики исследования тепловых процессов  
при дуговой сварке

Студент

Д.Д. Рыжова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный руководитель

д.т.н., профессор, А.И. Ковтунов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Тольятти 2020

## Содержание

|                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                                                                                             | 4  |
| 1 Тепловые и кристаллизационные процессы при сварке .....                                                                                                 | 6  |
| 1.1 Особенность тепловых процессов при сварке.....                                                                                                        | 6  |
| 1.2 Особенности кристаллизационных процессов при сварке.....                                                                                              | 7  |
| 1.3 Методика и оборудование для исследования тепловых и<br>кристаллизационных процессов при сварке на кафедре СОМДиРП .....                               | 9  |
| 1.3.1 Методика экспериментальных исследований процесса<br>распределения тепла при сварке .....                                                            | 12 |
| 1.3.2 Методика определения эффективной мощности сварочных<br>источников теплоты калориметрическим методом.....                                            | 21 |
| 1.3.3 Методика определения теплоотвода в сопло плазмотрона от столба<br>сжатой дуги.....                                                                  | 22 |
| 1.3.4 Методика исследования процесса затвердевания сварочной ванны с<br>использованием метода материального моделирования.....                            | 23 |
| 2 Модернизация оборудования и методика исследования процесса<br>затвердевания сварочной ванны с использованием метода материального<br>моделирования..... | 27 |
| 2.1 Модернизация оборудования для исследования процесса затвердевания<br>сварочной ванны с использованием метода материального моделирования..            | 27 |
| 2.2 Методика исследования процесса затвердевания сварочной ванны с<br>использованием метода материального моделирования.....                              | 32 |
| 3 Разработка оборудования и методика исследования тепловых процессов..                                                                                    | 34 |
| 3.1 Разработка оборудования и методика исследования эффективной<br>тепловой мощности сварочных источников теплоты калориметрическим<br>методом.....       | 34 |
| 3.1.1 Анализ классификации калориметров.....                                                                                                              | 34 |
| 3.1.2. Конструкция установки для определения эффективной мощности<br>сварочных источников теплоты калориметрическим методом.....                          | 42 |

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.3. Калибровка калориметра.....                                                                                       | 52 |
| 3.1.4. Методика определения эффективной тепловой мощности<br>сварочных источников теплоты калориметрическим методом..... | 57 |
| 3.2. Разработка оборудования и методика определения теплоотвода в сопло<br>плазмотрона прямого действия.....             | 63 |
| 3.2.1 Конструкция установки для определения теплоотвода в сопло<br>плазмотрона от столба сжатой дуги.....                | 63 |
| 3.2.2 Методика по определению теплоотвода в сопло плазмотрона от<br>столба сжатой дуги.....                              | 70 |
| 3.3 Разработка оборудования и методика исследования влияния режимов<br>сварки плавлением на температурное поле.....      | 71 |
| 3.3.1 Модернизация оборудования для исследования влияния режимов<br>сварки плавлением на температурное поле.....         | 71 |
| 3.3.2 Методика для исследования влияния режимов сварки плавлением на<br>температурное поле.....                          | 77 |
| Заключение .....                                                                                                         | 79 |
| Список используемой литературы и используемых источников.....                                                            | 80 |

## Введение

«В 1960 году в вечернем филиале Куйбышевского индустриального института в Ставрополе был открыт набор на дневное и вечернее отделение по специальности «Оборудование и технология сварочного производства» [1, с.7]. С этого момента в нашем городе практически появилась школа специалистов сварочного производства и стала развиваться научная и исследовательская деятельность в области сварки.

Сварочные процессы многообразны, и если считать, весь спектр способов сварки, основываются совершенно на различных физических явлениях. Сварочные процессы включают в себя: тепловые процессы, процессы кристаллизации и перекристаллизации, физико-химические и металлургические процессы, источники энергии для сварки, деформационные процессы и т.д.

Одни из основных процессов при сварке это тепловые и кристаллизационные процессы. Под тепловыми процессами при сварке принято подразумевать процессы, приводящие к изменению температуры свариваемых изделий (и присадочного материала) за счет тепла, подводимого от источников сварочного нагрева, распространения тепла по изделию и отвода его в окружающую среду [2, с.155]. «Кристаллизация металла подразумевает переход из жидкого состояния в твердое кристаллическое состояние» [3, с.8; 4, с.28; 5, с.21].

Тепловые и «кристаллизационные процессы определяют и свариваемость металла и свойства сварных соединений» [4, с.32]. На кафедре «Сварка, обработка металлов давлением и родственные процессы» разработано специальное и специализированное исследовательское оборудование, позволяющее проводить исследования, сотрудникам, студентам и аспирантам тепловых и кристаллизационных процессов при сварке, а так же проводить подготовку будущих специалистов. С учетом

существующего оборудования разработаны методики проведения исследований тепловых и кристаллизационных процессов при сварке.

Однако исследовательское оборудование и лабораторные стенды, которые «определяют существующие методики исследования сварочных процессов» [6, с.3] были изготовлены 25 и более лет назад с использованием устаревшей базы, комплектующих использование которых, не позволяет адекватно проводить исследования с учетом современных требований. В связи с этим на кафедре стоит остро проблема обновления исследовательского оборудования, стендов.

Поэтому цель работы является повышение достоверности результатов исследования тепловых и кристаллизационных процессов при сварке в условиях Тольяттинского государственного университета, за счет модернизации лабораторного оборудования кафедры «СОМДиРП».

# **1 Тепловые и кристаллизационные процессы при сварке**

## **1.1 Особенность тепловых процессов при сварке**

Под тепловыми процессами при сварке принято подразумевать процессы, приводящие к изменению температуры свариваемых изделий (и присадочного материала) за счет тепла, подводимого от источников сварочного нагрева, распространения тепла по изделию и отвода его в окружающую среду. Тепловые условия определяют процессы плавления и кристаллизации, а так же изменения структуры в зоне термического влияния, объемные изменения, появления упругих и пластических деформаций в свариваемых изделиях.

Эти процессы оказывают «значительное влияние на качество сварного соединения» [7, с.44] и всей сварной конструкции в целом, поэтому значительный интерес к изучению тепловых процессов при сварке появился сразу же в начале внедрения сварки в промышленность.

К тепловым процессам относятся, скорость переноса энергии: нагревание металла шва и околошовной зоны, охлаждение металла, испарение металла шва, плавление металла шва и др. Процессы переноса теплоты сопровождаются физико-химическими процессами в зоне сварочной ванны.

Основа теории тепловых процессов была заложена в трудах Рыкалина Н.Н. в середине прошлого века [8, 9]. В его трудах «систематизированы методы тепловых расчетов сварочных процессов, а так же рассмотрены процессы распространения тепла при нагреве металла дугой и газовым пламенем» [8, с.3].

За последние годы появилось большое количество работ и публикаций [10], в которых экспериментальными и расчетными методами изучались тепловые процессы при сварке [11-14]. Среди них можно выделить две характерные группы, связанные с решением различных теоретических и практических задач.

Это в первую очередь группа вопросов, связанная с изучением температурных полей и температурных циклов в свариваемом изделии в зависимости от способа, режимов и условий сварки, свойств материала изделия, его геометрических размеров и формы.

Вторая группа вопросов - это изучение нагрева и скорости плавления присадочного материала и электродов, в частности электродной проволоки, при механизированных способах сварки и штучных электродов с покрытиями.

Подробный анализ всех этих вопросов проведен Березовским в своих трудах по сварочным процессам [15-17].

## **1.2 Особенности кристаллизационных процессов при сварке**

В процессе сварки «формируется сварочная ванна и перемещается за сварочным источником» [18, с.6]. В хвостовой части сварочной ванны расплавленный металл охлаждается ниже температуры ликвидус и переходит в кристаллическое состояние, образуя сварной шов.

Кристаллизация металла сварочной ванны начинается на границе сварочной ванны и основного металла. Для сталей различают первичную кристаллизацию и вторичную.

Под первичной понимают переход из жидкого состояния в твердое. Если металл не имеет аллотропических превращений, то его структура будет определяться только процессами первичной кристаллизации.

Металлы и сплавы, имеющие полиморфное превращение после кристаллизации претерпевают вторичную перекристаллизацию, которая сопровождается переходом из одной аллотропической модификации в другую. При этом перекристаллизация сопровождается не только изменением типа кристаллической решетки, но и изменением структуры, что влечет изменением физико-механических и эксплуатационных свойств металлов.

«Первичная кристаллизация металла сварочной ванны протекает периодически, так как периодически ухудшается теплообмен, периодически выделяется скрытая теплота кристаллизации» [7, с.46]. Все это «приводит к слоистому строению металла шва, к появлению ликвации, как зональной, так и дендритной» [7, с.46].

Скорость кристаллизации определяется объемом сварочной ванны, скоростью охлаждения металла и изменяется в пределах 0,01-10мм/сек.

Под «зональной (слоистая) ликвация проявляется в неоднородности химического состава металла шва в периферийной и центральной зонах. Это является следствием того, что металл периферийных зон затвердевает раньше и поэтому содержит меньше примесей, а металл центральной зоны оказывается обогащенным примесями» [18, с.7].

Дендритная ликвация определяет неоднородность химического состава в пределах кристалла. «Первые кристаллиты (центральные и начальные части дендритов) содержат меньше примесей, а междендритное пространство оказывается более загрязненным примесями. На процесс ликвации существенно влияет способ сварки. Улучшая условия диффузии ликвирующих примесей в твердом металле, можно значительно снизить как слоистую, так и дендритную ликвации. Например, увеличивая скорость охлаждения металла, сокращают длительность двухфазного состояния металла сварочной ванны и этим снижают степень неоднородности состава жидкой и твердой фаз. Большое значение имеет температурный интервал кристаллизации. Чем меньше температурный интервал кристаллизации, тем ниже уровень ликвации. Например, в сталях низкоуглеродистых, имеющих интервал кристаллизации 25...35°C, ликвация незначительна. С увеличением содержания в стали углерода температурный интервал кристаллизации возрастает, и степень ликвации повышается» [19, с.148].

При вторичной кристаллизации изменяются формы и размеры зерен. Особенности вторичной кристаллизации определяются тепловыми условиями охлаждения металла шва, химическим составом и т.д.

Процессы вторичной перекристаллизации происходят не только в пределах металла шва, но и в зоне термического влияния. При этом происходят не только структурные изменения металла, но и изменения его свойств. Механические свойства низкоуглеродистой стали при сварке в зоне термического влияния изменяются незначительно, а при сварке легированных сталей и сварке среднеуглеродистых сталей в зоне термического влияния происходят структурные изменения, приводящие к образованию в металле шва закалочных структур, что может способствовать образованию трещин. Применение специальных технологических мер и выбор оптимальных режимов сварки позволяют уменьшить вероятность образования таких структур, приводящих к появлению холодных трещин.

### **1.3 Методика и оборудование для исследования тепловых и кристаллизационных процессов при сварке на кафедре СОМДиРП**

На кафедре в течение 50 лет разработаны следующие методики исследования тепловых процессов:

1. Методика исследования влияния режимов сварки плавлением на температурное поле.
2. Методика исследования температурного поля при сварке разнородных металлов с использованием метода электро моделирования.
3. Методика экспериментальных исследований процесса распределения тепла при сварке.
4. Методика исследования процесса легирования металла при сварке покрытым электродом и под слоем флюса.
5. Методика исследования особенностей распространения тепла при сварке круговых швов на плоскости.
6. Методика исследование распределения тепла свободных сварочных дуг.
7. Методика исследования параметров сварочной ванны при сварке металла толщиной 2-4мм.

8. Методика изучения влияния конструкции вольфрамового электрода на его стойкость и устойчивость дуги.
9. Методика исследования фазовых и структурных превращений в металле шва сварных соединений.
10. Методика определения эффективной мощности сварочных источников теплоты калориметрическим методом.
11. Методика влияния режимов сжатой дуги на ее тепловые характеристики.
12. Методика определения теплоотвода в сопло плазматрона от столба сжатой дуги.
13. Методика по изучению изолирующей прослойки между столбом сжатой дуги и стенкой сопла плазматрона.
14. Методика исследования напряженности электрического поля в канале плазматрона сжатой дуги.
15. Методика исследования выделения энергии в канале плазматрона сжатой дуги.
16. Методика определения области безаварийных режимов работы плазматрона.
17. Методика исследования газокINETического давления сжатой дуги.
18. Методика исследования размеров сварочной ванны при действии неподвижной дуги на поверхность пластины.
19. Методика исследования влияния параметров неподвижного источника тепла и теплофизических свойств металла на температуру сварочной ванны.
20. Методика исследования особенностей образования сварочной ванны от неподвижного источника тепла у края пластины.
21. Методика расчетно-экспериментального метода определения режимов автоматической сварки под флюсом стыковых соединений без разделки кромок.

22. Методика расчета режимов автоматической сварки под флюсом стыковых соединений углеродистых сталей без разделки кромок.

23. Методика технологии и оборудовании для сварки алюминиевых сплавов сжатой трехфазной дугой.

24. Методика точечной плазменной сварки пластин из алюминиевых сплавов толщиной 0,5...1,5 мм трехфазной дугой.

25. Методика определения требуемой точности поддержания режима при точечной плазменной сварке.

Для исследования кристаллизационных процессов разработаны следующие методические материалы:

1. Методика исследования процесса затвердевания сварочной ванны с использованием метода материального моделирования.

2. Методика исследования структуры сварных соединений при сварке теплоустойчивых сталей

С учетом анализа оборудования применяемого для исследования тепловых и кристаллизационных процессов предложено модернизировать оборудование для следующих методик:

1. Методика экспериментальных исследований процесса распределения тепла при сварке.

2. Методика определения эффективной мощности сварочных источников теплоты калориметрическим методом.

3. Методика определения теплоотвода в сопло плазмотрона от столба сжатой дуги.

4. Методика исследования процесса затвердевания сварочной ванны с использованием метода материального моделирования.

### 1.3.1 Методика экспериментальных исследований процесса распределения тепла при сварке

Целью методики является приобрести «опыт и навыки экспериментального определения температуры в ходе нагрева и охлаждения при сварке» [20, с.10].

Порядок проведения экспериментальных исследований следующий:

1. Подготовить два образца - пластины из низкоуглеродистой стали для наплавки валиков; покрытые электроды типа МР-3, УОНИ 13/45; штангенциркуль, слесарные инструменты; термопару или проволоку для ее изготовления, секундомер, милливольтметр или другой измерительный прибор типа Ш4500 (шкала прибора должна соответствовать используемой термопаре) (Рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Принадлежности

2. Ознакомиться со сварочным постом и оснасткой. Источники питания должны обеспечивать варку, как на постоянном, так и на переменном токе.

3. Заварить термопару (рисунки 1.2-1.4) и получить «горячий» спай (рисунок 1.5). Для измерения температур «используют обычно металлические термопары из благородных и неблагородных металлов, неметаллические термопары и низкотемпературные датчики [21, с.15]. В

качестве термоэлектрического термометра можно использовать термопары хормель-копель, хромель-алюмель [22, с.8; 23, 24] Проверить работоспособность прибора (рисунок 1.6) нагревом горячего спая.



Рисунок 1.2 – Проволока для изготовления термопары



Рисунок 1.3 – Заварка термопары



Рисунок 1.4 – Получение термопары

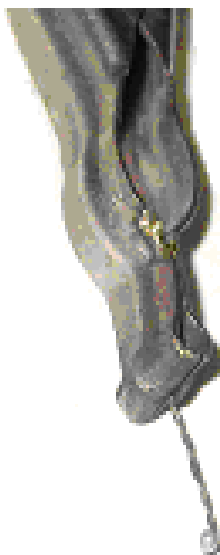


Рисунок 1.5 – «Горячий» спай



Рисунок 1.6 – Проверка работоспособности термопары

4. Установить сварочный ток в зависимости от диаметра предложенного электрода (приблизительно 50 А на каждый мм диаметра).
5. Подготовить свариваемые образцы - пластинки для эксперимента. Внешнюю поверхность образца подготовить, для этого поверхность зачищается абразивным инструментом и обезжиривается (рисунок 1.6).



Рисунок 1.7 – Подготовка образцов

С помощью отметить место расположения термопары (рисунок 1.7).

6. В отмеченной точке сверлится отверстие для зачеканки термопары (отверстие должно быть глухим, глубиной 0,5...0,75 толщины пластина) (рисунок 1.8, 1.9).



Рисунок 1.8 – Рассверловка пластин

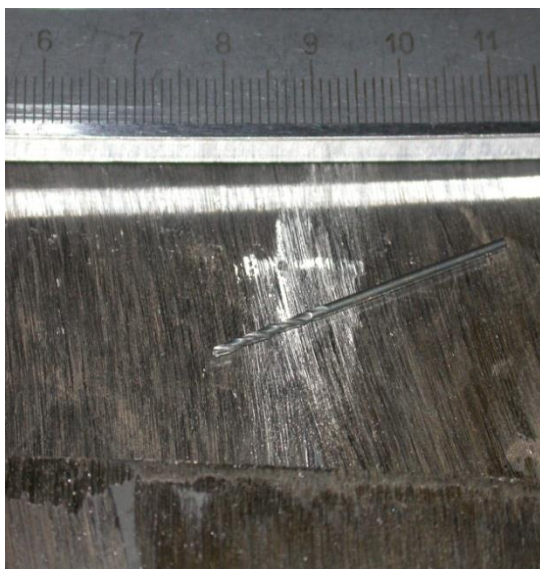


Рисунок 1.9 – Получение отверстия

«Горячий» спай зачеканивается в отверстии с помощью керна (рисунок 1.10), причем термопара располагается в соответствии с (рисунок 1.11).



Рисунок 1.10 – Зачеканка термопары



Рисунок 1.11 – Получение зачеканки

7. При проведении первого опыта расположить термопару по середине пластины на равном расстоянии изделия от краев (рисунок 1.12а). При проведении второго опыта расположить термопару на расстоянии 5 мм от края пластины (рисунок 1.12б).

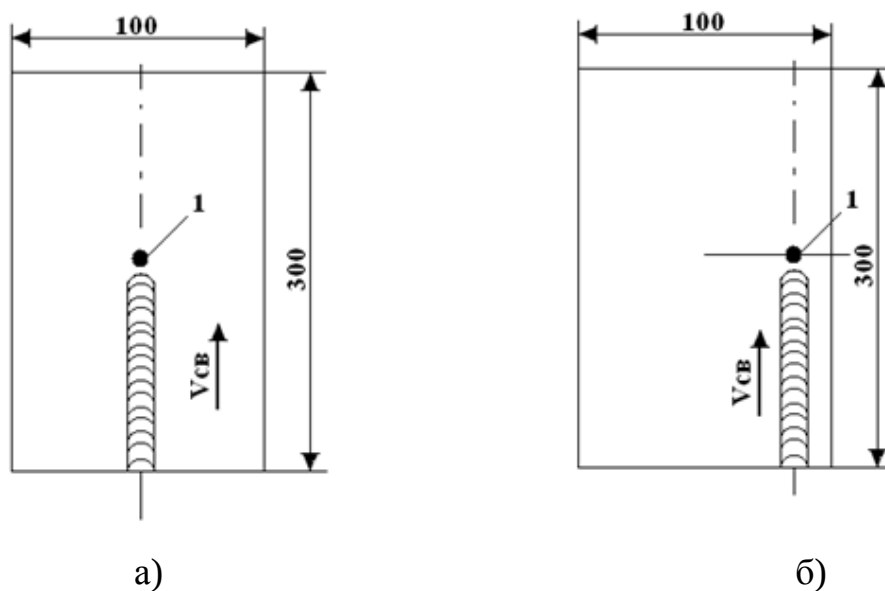


Рисунок 1.12 – Схема расположения термопары

8. Произвести наплавку валика, используя электроды с противоположной стороны пластины (рисунок 1.13). В процессе наплавки

фиксируется температура через определенные моменты времени (рисунок 1.14). Показания температуры заносятся в таблицу (таблица 1.1).



Рисунок 1.13 – Наплавка валика

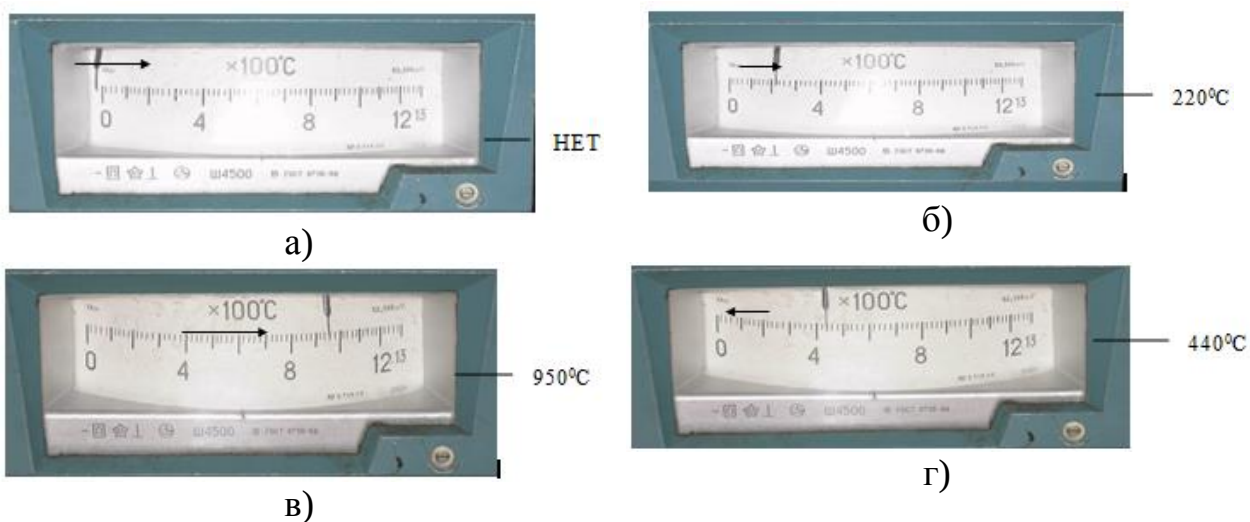


Рисунок 1.14 – Фиксирование температуры

9. Повторить наплавку, ибо другой маркой электрода, ибо этим же, но на постоянном токе другой полярности (отличной от первого опыта), повторив все предыдущие операции (см.пп.6-8).

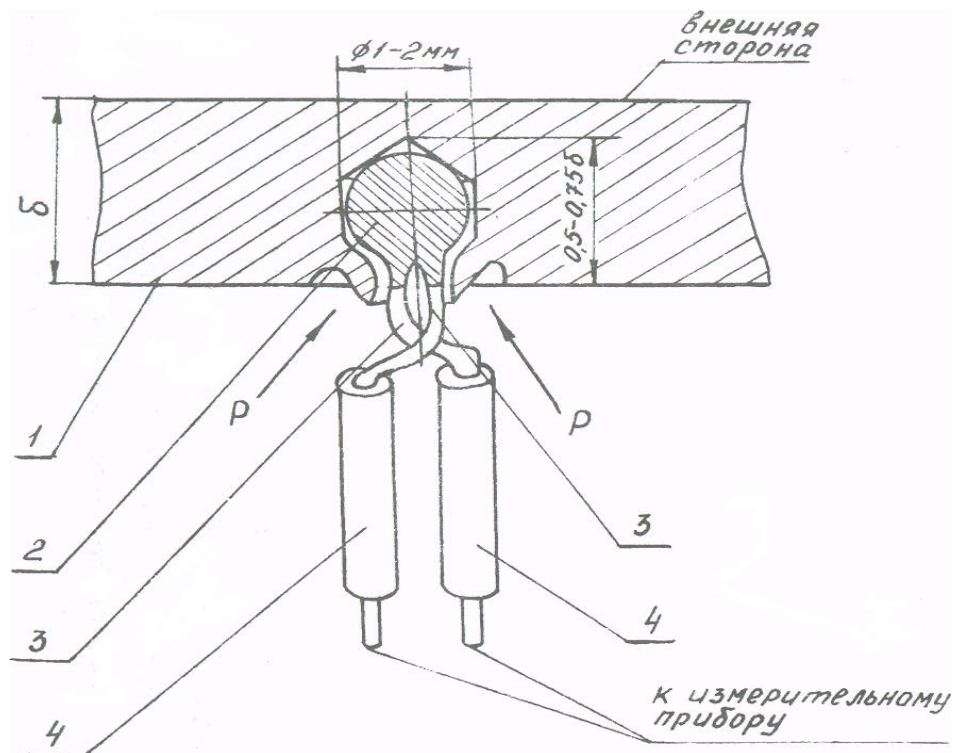


Рисунок 1.15 – Схема зачеканки термопары: 1 - свариваемый образец;  
 2 – «горячий» спай термопары; 3 - проводящие ТЭДС элементы;  
 4 - керамические изоляторы; Р - усилие кернения;  
 δ - толщина свариваемого образца

10. После остываний пластин с наплавками измерить по цветам побежалости с помощью штангенциркуля ширину областей имеющих различные цвета побежалости (рисунок 1.16), и занести в (таблицу 1.2).

11. Построить термический цикл для точки закрепления термопары по измеренным показаниям (таблица 1.1).

12. Определить распределение температуры в различных точках остывшего образца по цветам побежалости (рисунок 1.16) и построить зависимость.

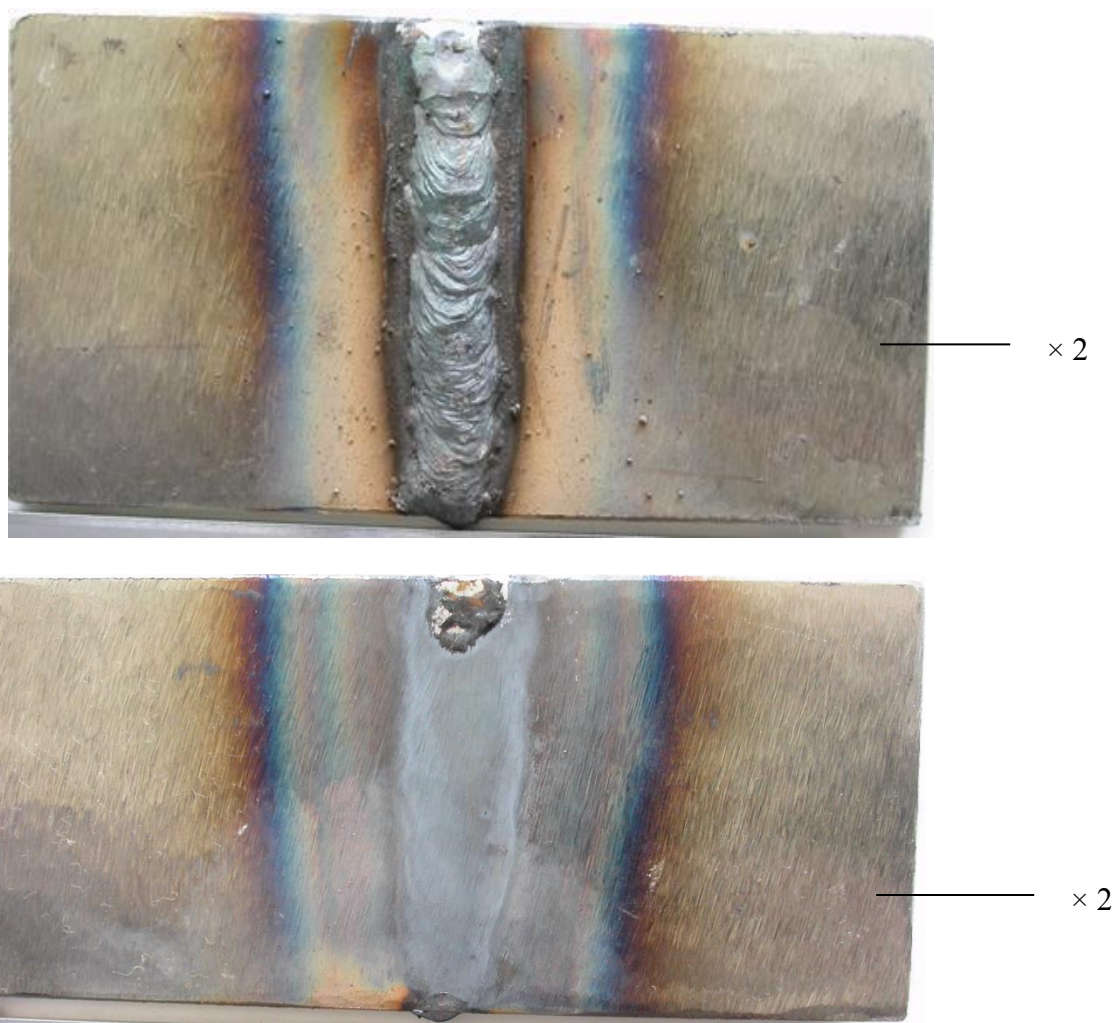


Рисунок 1.16 – Определение температуры по цветам побежалости

13. Сравнить результаты для различных марок электродов, рода сварочного тока и его полярности.

Таблица 1.1 - Температура процесса наплавки

| Время, с | Температура, °C | Время, с | Температура, °C | Время, с | Температура, °C |
|----------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|
|----------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|

Таблица 1.2 – Зависимость цвета побежалости стали от температуры [25, с.48]

| Цвет побежалости                        | Температура, °С | Ширина области, мм |
|-----------------------------------------|-----------------|--------------------|
| Серый                                   | 325             |                    |
| Светло-синий                            | 310             |                    |
| Ярко-синий                              | 295             |                    |
| Фиолетовый                              | 285             |                    |
| Пурпурно-красный                        | 275             |                    |
| Красно-коричневый<br>(кирпичный, бурый) | 265             |                    |
| Коричнево-желтый                        | 255             |                    |
| Темно -желтый                           | 240             |                    |
| Светло-желтый                           | 225             |                    |
| Светло-соломенный                       | 200             |                    |

### 1.3.2 Методика определения эффективной мощности сварочных источников теплоты калориметрическим методом

Целью методики является изучение эффективной мощности  $q_{\text{и}}$  сварочных источников теплоты и освоение калориметрического метода для исследования эффективности различных источников теплоты [26, с 25; 27, с.36].

Порядок проведения экспериментальных исследований следующий:

1. Ознакомиться с описанием установки;
2. Заполнить калориметр 250 мл дистиллированной воды, плотно закрыть крышку калориметра с помощью фиксатора;
3. Измерить температуру в калориметре до проведения опыта,  $T_0$ ;
4. Установить сварочный ток на источнике питания ВСВУ - 400 ручкой регулировки на выбранное значение.
5. Калориметрируемый образец поместить на огнеупорную плиту;
6. Произвести нагрев образца из Ст 3 толщиной 3 мм аргонно-дуговой горелкой, фиксируя время нагрева  $t_r$ , сварочный ток  $I_{\text{св}}$ , напряжение  $U_{\text{св}}$ ;
7. После проведения нагрева немедленно поместить образец через специальное отверстие в калориметр, закрыть заглушку;

8. Включить мешалку. Контролировать температурные изменения до их стабилизации.

9. Выключить мешалку. Зафиксировать температуру после проведения опыта,  $T_k$ ;

10. Рассчитать  $\Delta T_B$ ,  $\Delta T_B = T_k - T_0$ ;

11. Рассчитать:

- теплоту, поглощенную водой:  $Q_1 = \Delta T_B \cdot m_B \cdot c_B \cdot \rho_B$ ;

- теплоту, поглощенную калориметром:  $Q_k = Q_1 + A \cdot \Delta T_B$ ;

- теплоту, определяющую полный запас тепловой энергии образца до и после опыта:  $Q_{\Delta} = c_{об} \cdot m_{об} (T_k - T_B)$ ;

- теплоту, теряемую на парообразование при погружении образца в калориметр:  $Q_n = 2608 \cdot m_n$ ;

- теплоту, теряемую в окружающую среду при нагреве и переносе образца:

$$Q_r = \alpha \cdot q_{и} (t_r^2 + 2t_r \cdot t_n) / c_{об} \rho_{об} \delta_{об}$$

12. На основании полученных значений рассчитать эффективную тепловую мощность и эффективный КПД сварочных источников теплоты:

$$q_{и} = (Q_k + Q_{\Delta} + Q_n) / [t_r - \alpha (t_r^2 + 2t_r \cdot t_n) / c_{об} \rho_{об} \delta_{об}] \text{ и } \eta_{и} = q_{и} / I_{св} \cdot U_{св}.$$

13. Аналогичные действия произвести с различными значениями тока (3 значения), оставляя постоянными длину дуги и время нагрева образца.

14. На основании полученных данных построить графики зависимостей:

$$y(\Delta T) = f(I), y(q_{и}) = f(I), y(\eta_{и}) = f(I).$$

### **1.3.3 Методика определения теплоотвода в сопло плазмотрона от столба сжатой дуги**

Цель методики изучить влияние параметров режима сжатой дуги на теплоотвод в сопло плазмотрона прямого действия [20, с.22].

Порядок проведения экспериментальных исследований следующий:

1. Ознакомиться с описанием установки;

2. Установить сварочный ток на источнике питания ВСВУ - 400 ручкой регулировки на выбранное значение;

3. Подать газ в плазмотрон. Зажечь «вспомогательную (дежурную) дугу между электродом и соплом плазмотрона искровым разрядом от осциллятора. Под действием газа дежурная дуга образует струю плазмы небольшой мощности. При ее соприкосновении с деталью зажигается рабочая дуга» [28, с.15].

4. С помощью водяного ротаметра проконтролировать объем воды, поступающей через тройник на вход плазмотрона.

5. За время работы плазмотрона путем проточного калориметрирования с помощью термопар ТХК, установленных в тройнике на входе и выходе плазмотрона, измерять температуру воды до ее стабилизации;

6. Рассчитать мощность, отводимую в сопло плазмотрона:  $Q_c = (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})C_v$ .

7. Рассчитать средний тепловой потенциал аргона в канале, характеризующий среднюю температуру газа:  $Sc = Q_c / 8\pi l_c$ .

8. Рассчитать вольтоэквивалент напряжения, соответствующий мощности  $Q_c$ :  $U_q = Q_c / I_d$ .

#### **1.3.4 Методика исследования процесса затвердевания сварочной ванны с использованием метода материального моделирования**

Целью является освоение методики материального моделирования с целью более глубокого понимания физических процессов, лежащих в основе затвердевания сварочной ванны.

Порядок проведения экспериментальных исследований следующий:

1. Подбор необходимого количественного и качественного состава моделирующих солей, в качестве солей использовали: Калий азотнокислый  $KNO_3$  и Натрий азотнокислый  $NaNO_3$  (рисунок 1.17).



Рисунок 1.17 – Набор солей

2. Включить привод предметного столика. Подвести стержень паяльника к предметному столику, чтобы нижняя плоскость стержня касалась предметного столика, но не мешала его движению. Прогреть предметный столик в течении 10-15 мин.

3. Настроить установку для визуального наблюдения в следующем порядке:

а) отрегулировать освещение с помощью соответствующих центровочных ручек и винтов установки, при этом световое пятно должно освещать часть предметного столика и внешний срез торца паяльника (рисунок 1.19);

б) настроить оптическую систему установки. Управляя ручками (рисунок 1.20), установить их в таком положении, чтобы отчетливо была видна кромка жала паяльника. Включить вращение столика и нанести на его поверхность слой соли шириной 3-5 мм больше, чем рабочий диаметр стержня паяльника, толщиной 1-2 мм по всему периметру предметного столика;

в) промоделировать все механизмы роста первичных кристаллитов на выбранной соли, фиксируя для каждого механизма роста значение скорости затвердевания;

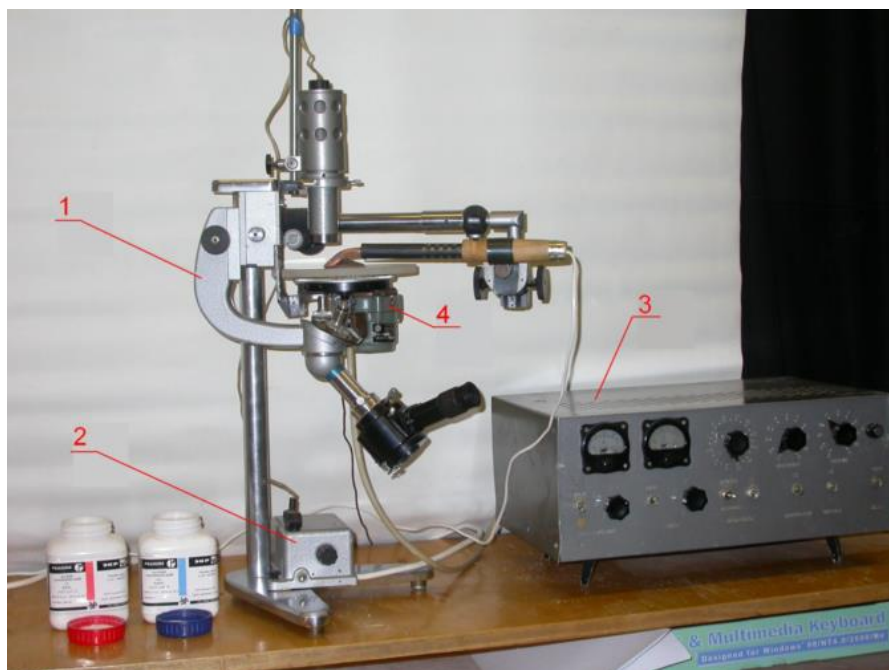


Рисунок 1.18 – Общий вид установки: 1 – система материального моделирования; 2 – блок управления скоростью сварки; 3 – блок питания лампы освещения; 4 – блок питания двигателя.



Рисунок 1.19 – Регулировка освещения

г) промоделировать механизмы роста кристаллитов, используя смеси солей. Сравнить скорости затвердевания чистого расплава соли и расплава смеси солей при одинаковых механизмах роста;

д) промоделировать процесс затвердевания сварочного кратера. Зафиксировать поведение расплава соли, когда источник тепла прекращает свое действие. Резко вывести паяльник из контакта с предметным столиком;



Рисунок 1.20 – Настройка оптической системы

е) зарисовать часть шва (расплавленная соль). Указать следы фронта затвердевания первичной границы роста кристаллитов. Для этого либо получить фотографию наблюдаемой картины, либо с помощью телевизионной установки изучить наблюдаемую картинку на экране монитора компьютера.

Таким образом, реализации цели нужно решить следующие задачи:

- модернизировать лабораторное оборудование для исследования процессов кристаллизации;
- спроектировать и изготовить оборудование для исследования тепловых процессов при сварке;
- разработать методики исследования тепловых процессов и процессов кристаллизации при сварке.

## 2 Модернизация оборудования и методика исследования процесса затвердевания сварочной ванны с использованием метода материального моделирования

### 2.1 Модернизация оборудования для исследования процесса затвердевания сварочной ванны с использованием метода материального моделирования

Для разработки методики моделирования и процессов кристаллизации сварочной ванны с учетом тех недостатков, которые были отмечены выше, модернизирована установка. Функциональная схема установки изображена на (рисунке 2.1) и (рисунке 2.2).

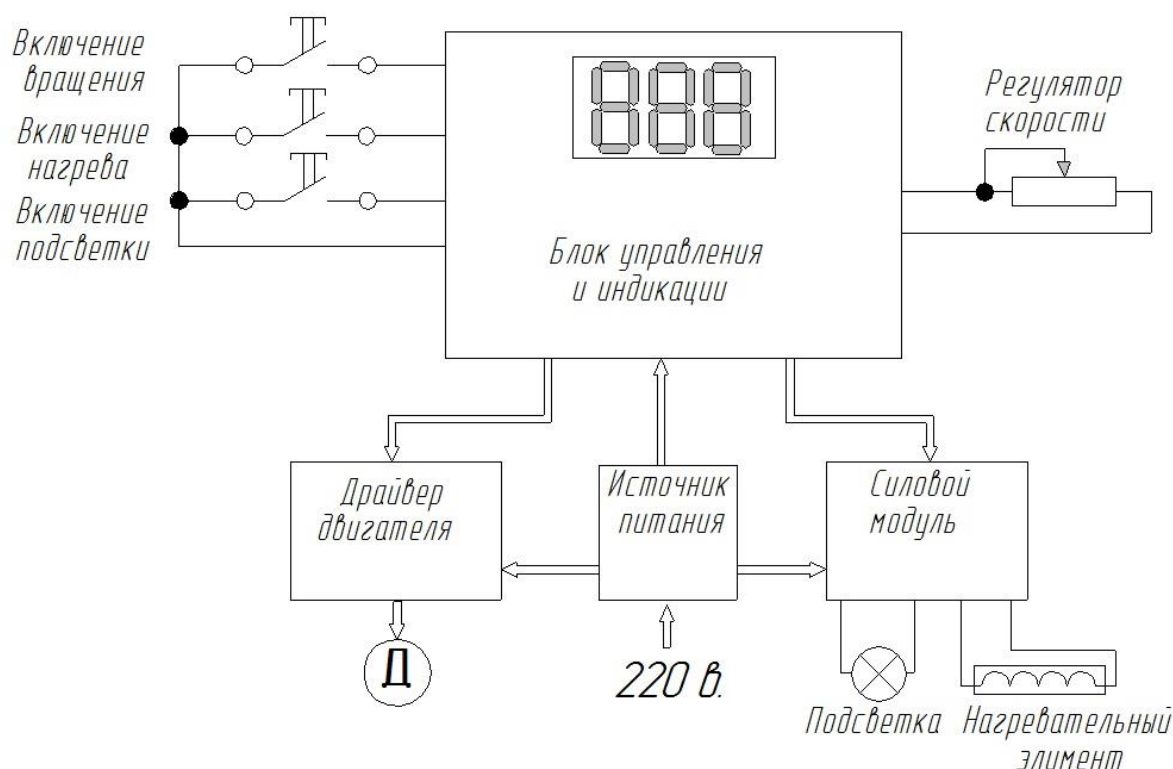


Рисунок 2.1 – Функциональная схема установки

Блок управления (рисунок 2.1.) представляет собой микропроцессорное устройство, которое принимая сигналы с регулятора скорости, выполненного

на энкодере, выводит значение на семисегментном индикаторе и формирует заданную частоту работы привода. В качестве привода вращения рабочего стола установлен шаговый двигатель FL86STH65, который работает совместно с микрошаговым драйвером PLD331, имеющего следующие технические характеристики:

**Технические характеристики драйвера PLD331:**

Напряжение питания модуля 18 ... 30В (типовое значение 27В)

Рабочий ток ШД 0.7А, 1.7А, 2.7А, 3.3А (дискретная регулировка)

Деление шага ШД (микрошаг) 1:1, 1:2, 1:8, 1:16

Максимальная частота сигнала STEP 50кГц

Максимальная частота вращения вала ШД 30 об/сек

Сопротивление изоляции 500 мОм

Рабочая температура 0 ... 50 °С

Вес модуля без упаковки 0,04кг

**Технические характеристики двигателя FL86STH65:**

Ток фазы 2.8 А

Сопротивление обмотки 1.4 Ом

Индуктивность 3.9 мГн

Крутящий момент 34 кгс/см.

Длина 65мм.

Масса 1.4 кг.

Скорость устанавливается в диапазоне от 10 до 200 мм/мин. с дискретностью 0,1 мм/мин. На лицевой панели блока управления также находятся кнопки включения и отключения вращения рабочего стола, нагрева и подсветки рабочей зоны микроскопа.

Двигатель FL86STH65 обеспечивает вращение стола на котором расположены модельные соли. Плавление солей обеспечивает тепло передаваемое паяльником (рисунок 2.4.). Расположение паяльника регулируется системой рычагов.

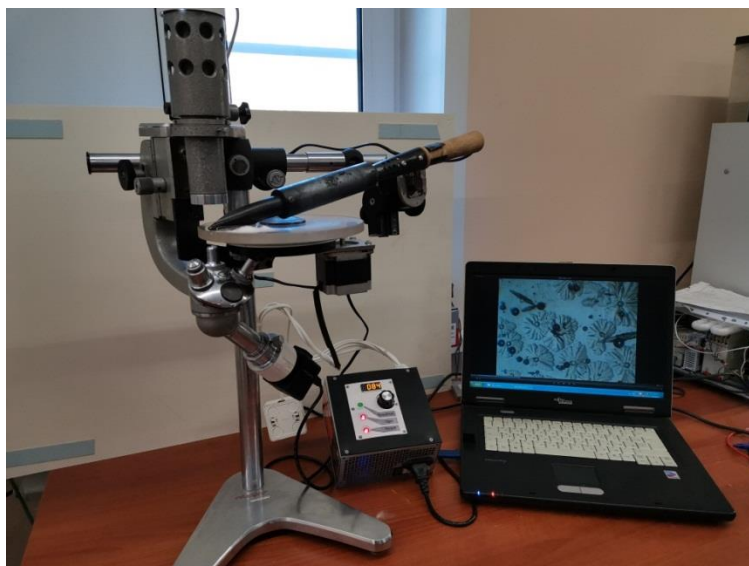


Рисунок 2.2 – Модернизированная установка для исследования процессов кристаллизации сварочной ванны



Рисунок 2.3 – Блок управления

Для передачи визуальной информации от микроскопа на экран монитора применяются пяти мегапиксельная CMOS USB цифровая камера (рисунок 2.5), имеющая следующие технические характеристики:

Размер: 50x55x40,5 мм.

Интерфейс: USB2.0.

Формат изображения: JPEG, BMP

Размер пикселя: 2 мкм x 2 мкм.

Частота кадров - 30 кадров в секунду

Автоматический Баланс белого

Экспозиция: ручная/автоматическая.

Формат изображения: JPG/BMP/PNG/GIF.

Формат видео: AVI.

Операционная система: Windows XP / win7 / win8 / win10 или выше/Vista. Изображение процесса плавления и кристаллизации фиксируется на экране монитора (рисунок 2.6.).



Рисунок 2.4 – Расплавленная ванна смешанных солей



Рисунок 2.5 – Цифровая камера

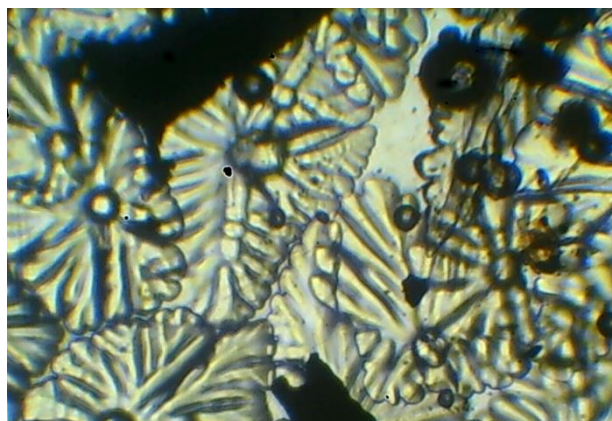
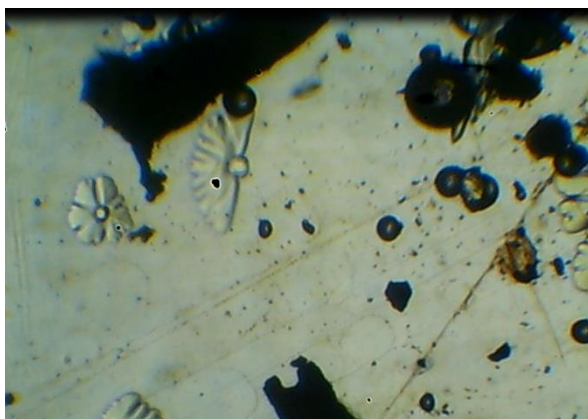


Рисунок 2.6 – Изображение процесса кристаллизации модельного расплава солей

## **2.2 Методика исследования процесса затвердевания сварочной ванны с использованием метода материального моделирования**

1. Подбор необходимого количественного и качественного состава моделирующих солей, в качестве солей использовали: Калий азотнокислый  $KNO_3$  и Натрий азотнокислый  $NaNO_3$ . Температура плавления и другие свойства этих веществ приводятся в справочной литературе [29, с.24, с.35; 30, с.251, с.375]

2. Включить привод предметного столика к установке. Подвести стержень паяльника к предметному столику, чтобы нижняя плоскость стержня касалась предметного столика, но не мешала его движению. Прогреть предметный столик в течении 10-15 мин.

3. Настроить установку для визуального наблюдения в следующем порядке:

а) отрегулировать освещение

б) настроить оптическую систему установки. Включить вращение столика и нанести на его поверхность слой соли шириной 3-5 мм больше, чем рабочий диаметр стержня паяльника, толщиной 1-2 мм по всему периметру предметного столика

в) настроить компьютер

г) промоделировать все механизмы роста первичных кристаллитов на выбранной соли, фиксируя для каждого механизма роста значение скорости затвердевания

д) промоделировать механизмы роста кристаллитов, используя смеси солей. Сравнить скорости затвердевания чистого расплава соли и расплава смеси солей при одинаковых механизмах роста

е) промоделировать процесс затвердевания сварочного кратера. Зафиксировать поведение расплава соли (рисунок 2.7), когда источник тепла прекращает свое действие. Резко вывести паяльник из контакта с предметным столиком



Рисунок 2.7 – Нагрев модельного состава

ж) сформировать отчет по швам (расплавленная соль). Указать следы фронта затвердевания первичной границы роста кристаллитов. Для этого получаем фотографию на экране монитора (рисунок 2.8).

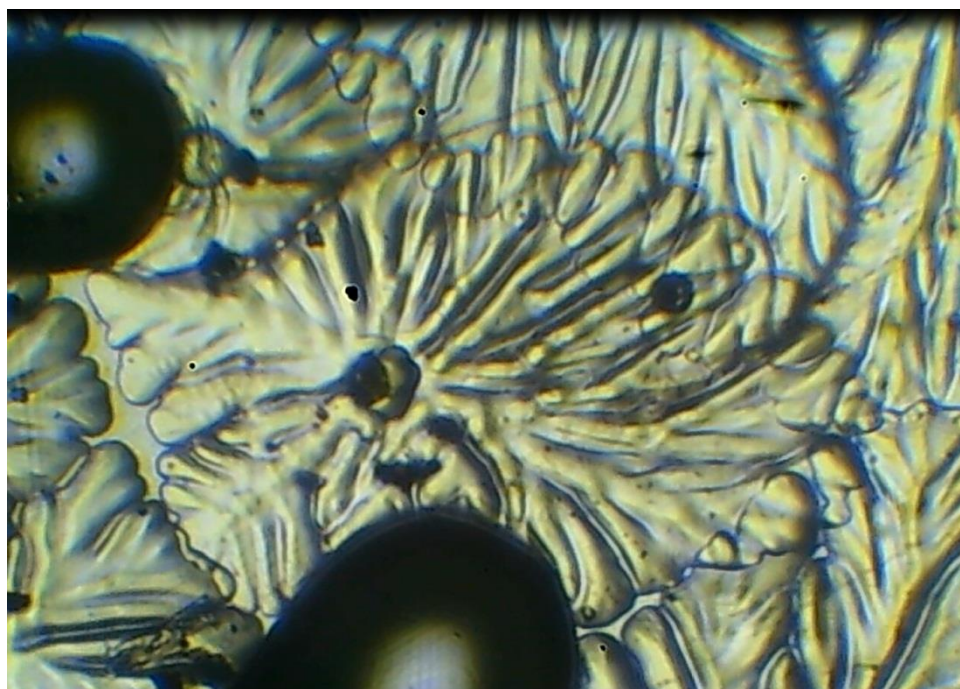


Рисунок 2.8 – Процесс кристаллизации

### **3 Разработка оборудования и методика исследования тепловых процессов**

#### **3.1 Разработка оборудования и методика исследования эффективной тепловой мощности сварочных источников теплоты калориметрическим методом**

##### **3.1.1 Анализ классификации калориметров**

«Теплота всегда ассоциируется с тепловым потоком, что подчеркивает ее количественную природу. Таким образом, в количественном отношении теплота – это количество энергии, которое обменивается в течение данного временного интервала в форме теплового потока. Для измерения теплоты, выделяемой или поглощаемой в различных процессах, используются приборы, называемые калориметрами» [31, с.18].

Калориметры «можно классифицировать на основании различных критериев, но каждая классификация должна содержать ясное представление о принципе измерения и режиме работы данной группы калориметров» [32, с.72].

В основу классификации рассматриваемых калориметров положены три признака: принцип конструкции прибора, метод и режим калориметрических измерений.

Методы калориметрических измерений базируются на следующих принципах [32, с.72]:

- «изменение количества превращенного при фазовом переходе вещества

при компенсации теплового эффекта этого процесса теплотой фазового перехода калориметрического вещества;

- измерения количества энергии электрического тока при компенсации

теплового эффекта реакции термоэлектрическими эффектами;

- измерение изменения температуры калориметра в зависимости от времени реакции;
- измерение изменения температуры по пространству калориметра;

Калориметры могут работать в следующих режимах:

- 1) изотермическом;
- 2) изопериболическом;
- 3) адиабатическом;
- 4) адиабатическом сканирующем;
- 5) изопериболическом сканирующем;
- 6) при сканировании температуры оболочки» [32, с.72].

Различают калориметры с одной калориметрической системой и дифференциальные (или двойные) [33].

Таблица 3.1 – Режимы измерений, применяемые в калориметрах с разными методами измерения [33]

| Метод измерения                          | Режим работы   |                  |                |             |
|------------------------------------------|----------------|------------------|----------------|-------------|
|                                          | изотермический | изоперболический | адиабатический | сканирующий |
| Компенсация фазовым переходом            | +              |                  | +              |             |
| Компенсация термоэлектрическим эффектом  | +              | +                | +              | +           |
| Измерение разности температур во времени |                | +                | +              |             |
| Измерение локальных разностей температур |                | +                |                | +           |

### **Калориметры фазового перехода**

Принцип работы калориметров фазового перехода следующий: «под действием теплоты, сообщенной калориметру внесенным исследуемым образцом, температура которого выше температуры калориметра, некоторое количество калориметрического вещества переходит из одной фазы в другую

(например, переход лед-вода). Количество теплоты, затраченное на этот фазовый переход, можно рассчитать, если известны удельная теплота фазового перехода и масса превращенного вещества» [32, с.73].

На рисунке 3.1 показана схема калориметра фазового перехода с калориметрическим веществом лед. «Стеклянная трубка, содержащая исследуемый образец, помещена в стеклянный сосуд, заполненный чистой водой и ртутью. Вся калориметрическая система погружена в смесь лед-вода. До начала эксперимента часть воды, окружающей трубку с образцом, замораживают при помощи охлаждающего агента. Таким образом, трубка с образцом оказывается окруженной ледяной оболочкой, находящейся в температурном равновесии с водой. Любое выделение или поглощение теплоты образцом приводит к плавлению или замерзанию соответствующей массы льда или воды. Так как плотности льда и воды при  $0^{\circ}\text{C}$  различны ( $\rho_{\text{лед}} = 0,91674 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_{\text{вода}} = 0,99984 \text{ г/см}^3$ ), то в результате фазового перехода объем смеси лед-вода в калориметрическом сосуде изменяется. Изменение объема определяют по перемещению уровня ртути в капилляре» [32, с.74].

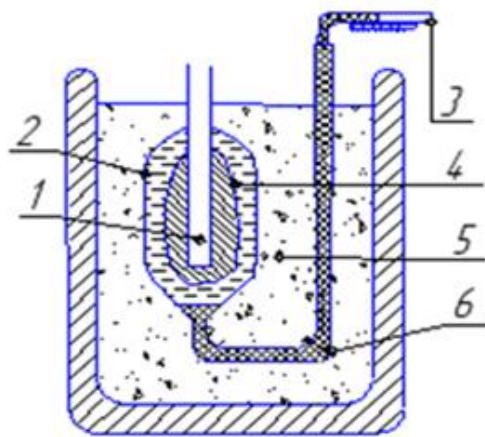


Рисунок 3.1 – Схема калориметра Бунзена:

- 1 – сосуд с образцом; 2 – калориметрический сосуд с водой;  
3 – капилляр со ртутью; 4 – лед; 5 – термостат;  
6 – трубка

Его преимущества заключаются в том, что теплообмен происходит только между оболочкой, и образцом.

### Калориметры фазового перехода жидкость-газ

К калориметрам фазового перехода относятся также калориметры, в которых в качестве калориметрического вещества используют легко испаряющуюся жидкость. «Чувствительность такого калориметра определяется отношением плотностей жидкости и газа (таблица 3.2), а также удельной теплотой испарения жидкости»[32, с.77].

Таблица 3.2 – Параметры фазовых переходов жидкость-газ

| Вещество         | $T_{\text{ф}}, ^\circ\text{C}$ | $\rho_{\text{ж}}, \text{г/см}^3$ | $\rho_{\text{газ}} \cdot 10^3, \text{г/см}^3$ | $\rho_{\text{ж}} / \rho_{\text{газ}}$ | Удельная теплота испарения, Дж/г |
|------------------|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| H <sub>2</sub> O | 100                            | 0,958                            | 0,598                                         | 1600                                  | 2256                             |
| NH <sub>3</sub>  | -33                            | 0,681                            | 0,897                                         | 759                                   | 1370                             |
| N <sub>2</sub>   | -196                           | 0,404                            | 2,230                                         | 176                                   | 199                              |

На рисунке 3.2 описан де калориметр фазового перехода жидкость-газ, в котором исследуемые образцы металлов пластически деформируются при растяжении в жидком азоте.

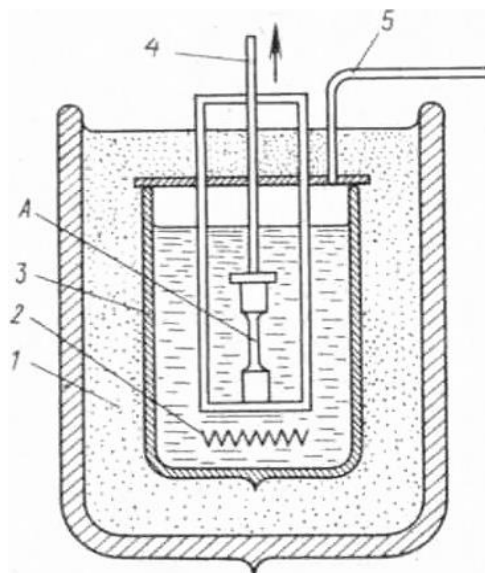


Рисунок 3.2 – Схема калориметра фазового перехода жидкость - газ (N<sub>2</sub>): 1 - термостат (жидкий азот); 2 - нагреватель; 3 - калориметрический сосуд с жидким азотом; 4 - устройство для растяжения; 5 - трубка для выхода газообразного азота; А - образец

К калориметрам, действие которых основано на использовании теплоты фазового перехода жидкость-газ, «относится также паровой

калориметр Бунзена. Образец при температуре  $T_2$  помещают в поток насыщенного пара. Сконденсировавшийся в образце пар передает свою теплоту конденсации образцу до тех пор, пока его температура не достигнет температуры  $T_1$ » [32, с.79].

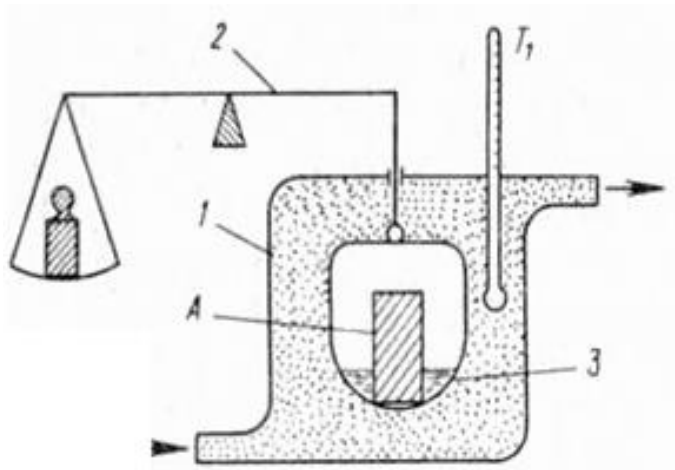


Рисунок 3.3 – Схема парового калориметра Бунзена:  
1- сосуд с газо-вой фазой (насыщенный пар); 2- весы;  
3- сосуд с конденсатом и образцом (А)

### Изотермические калориметры

Промышленный изотермический калориметр выпускается фирмой «Тронак». «Металлический изотермический реакционный сосуд помещен в термостат. Температура сосуда поддерживается постоянной при помощи термоэлемента охлаждения Пельтье постоянной мощности и импульсного электрического нагревателя. Рабочий интервал температур  $-10-60^{\circ}\text{C}$ ; флуктуация температуры составляет  $5-10^{-3}$  К. Тепловой эффект исследуемого процесса компенсируется путем изменения частоты импульсов нагревания, которая пропорциональна тепловому потоку» [32, с.86].

### Изопериболические калориметры

К изопериболическим калориметров относится прибор Тиана. «Этот прибор (рисунок 3.5.) представляет собой калориметр прямого измерения (т.е. прибор без сравнительной калориметрической системы).

Калориметрический сосуд (ячейка для исследуемого образца) соединен при помощи двух термобатарей с термостатом. Температура термостата поддерживается постоянной с точностью до 0,01 К» [32, с.86].

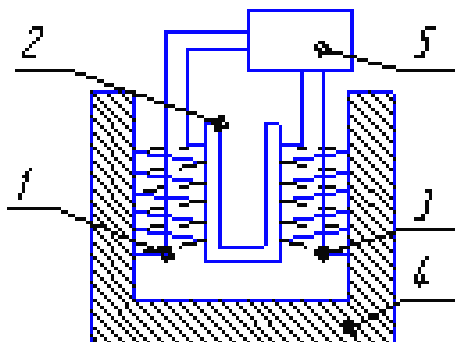


Рисунок 3.4 – Схема калориметра : 1 - термобатарея; 2 - сосуд; 3 - термоэлемент Пельтье; 4 - термостат; 5 - блок регистрации

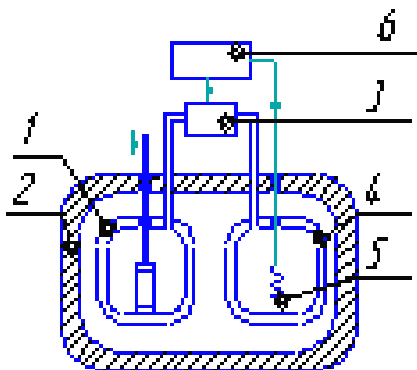


Рисунок 3.5 – Принципиальная схема деформационного калориметра Мюллера и Энгельтера: 1 - термостат; 2 - калориметрический сосуд с образцом; 3 - дифференциальный манометр; 4 - калориметрический сосуд сравнения; 5 - электрический нагреватель; 6 - блок управления.

«Мюллер и Энгельтер описали изопериболический деформационный ДМСК, работающий в квазиadiaбатическом режиме (рисунок 3.5.). В этом приборе оба одинаковых заполненных газом калориметрических сосуда соединены с камерой дифференциального манометра. В рабочем сосуде деформируют (растягивают) исследуемый твердый образец; в сосуде сравнения находится электрический нагреватель. При выделении деформируемым образцом теплоты, температура газа повышается, и давление в рабочем сосуде увеличивается. При этом следящая система дифференциальный манометр — блок управления обеспечивает дополнительное нагревание газа в сосуде сравнения, в результате чего давление в обоих сосудах уравнивается» [32, с.87].

## Сканирующие калориметры

Сканирующий калориметр «представляет собой адиабатический ДМСК и предназначен для измерения малых количеств теплоты, выделяемой при нагревании пластически деформированного образца меди в заданном интервале температур» [32, с.88].

Принцип работы калориметра следующий: «Исследуемый образец и образец сравнения в непосредственной близости друг от друга помещали в печь, нагреваемую линейно с заданной скоростью (например, 6 К/мин до 600 °С). Оба образца нагревали таким образом, чтобы разность температур образца сравнения и оболочки калориметра равнялась нулю. Если при нагревании исследуемый образец выделяет какое-то количество теплоты, то его температура с помощью блока управления поддерживается равной температуре образца сравнения. При этом соответственно уменьшается мощность нагревателя исследуемого образца. Разность мощностей нагревания двух образцов измеряется дифференциальным ваттметром как функция времени (температуры) (рисунок 3.6)» [32, с.88].

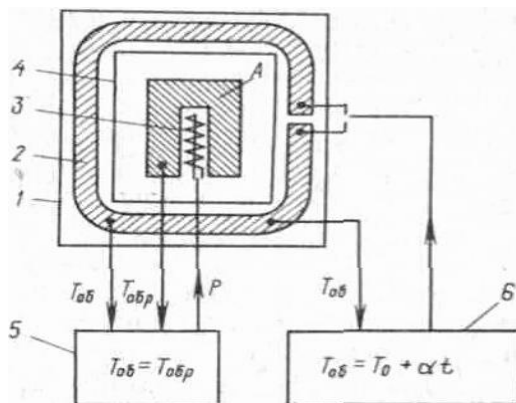


Рисунок 3.6 – Схема сканирующего калориметра :

1-термостат (оболочка); 2-нагреватель оболочки; 3-нагреватель образца;  
4-калориметрический сосуд с образцом (А); 5-блок управления;  
6-температурный программатор.

$T_{об}$ - температура оболочки,  $T_0$ - начальная температура оболочки,  
 $\alpha$ -скорость нагревания;  $T_{обр}$ -температура образца.

## Калориметры, основанные на изменении разности температур во времени

Один из калориметрических методов исследования основан на том, что калориметрическому веществу передается определенное количество теплоты исследуемым веществом и происходящее в результате этого изменение температуры измеряется как функция времени. Такие измерения позволяют определить удельную теплоемкость при известном количестве подведенной теплоты, либо, наоборот, по известной теплоемкости найти подведенную теплоту.

В зависимости от этого жидкостные калориметры подразделяют «на:

- 1) классические жидкостные калориметры, в которых взаимодействие образца с калориметрической жидкостью не происходит;
- 2) калориметры с реакционным сосудом – в реакционном сосуде с образцом, погруженным в калориметрическую жидкость, происходит реакция;
- 3) калориметры, в которых образец реагирует с калориметрической жидкостью» [32, 97].

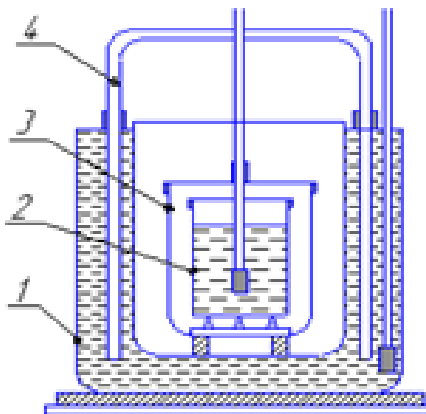


Рисунок 3.7 – Принципиальная схема классического калориметра смешения:  
1– термостат; 2– калориметрический сосуд; 3– защитный экран; 4- мешалка.

На рисунке 3.7 показана конструкция калориметра смешения. «В таких калориметрах сосуд, заполненный калориметрической жидкостью, хорошо теплоизолирован от внешней среды. Калориметрическая жидкость должна иметь низкое давление пара в температурном интервале измерений, быть химически инертной и легко смешиваться с исследуемыми веществами. Для измерений при

температурах, близких к комнатной, этим требованиям удовлетворяет вода» [32, 98].

На основании проведенного анализа для определения эффективной мощности сварочного источника теплоты выбран жидкостный калориметр смешения, в котором в качестве калориметрического вещества используется вода.

Так как в лабораторной работе по определению теплоотвода в сопло плазмотрона от столба сжатой дуги уже предложена конструкция плазмотрона с проточным калориметрированием, иную конструкцию рассматривать нет необходимости.

### **3.1.2. Конструкция установки для определения эффективной мощности сварочных источников теплоты калориметрическим методом**

Исходя из необходимости реального представления определения эффективной мощности сварочных источников теплоты калориметрическим методом была разработана лабораторная установка, которая в ходе проведения лабораторной работы дает наглядное представление студентам о характере выполняемой работы.

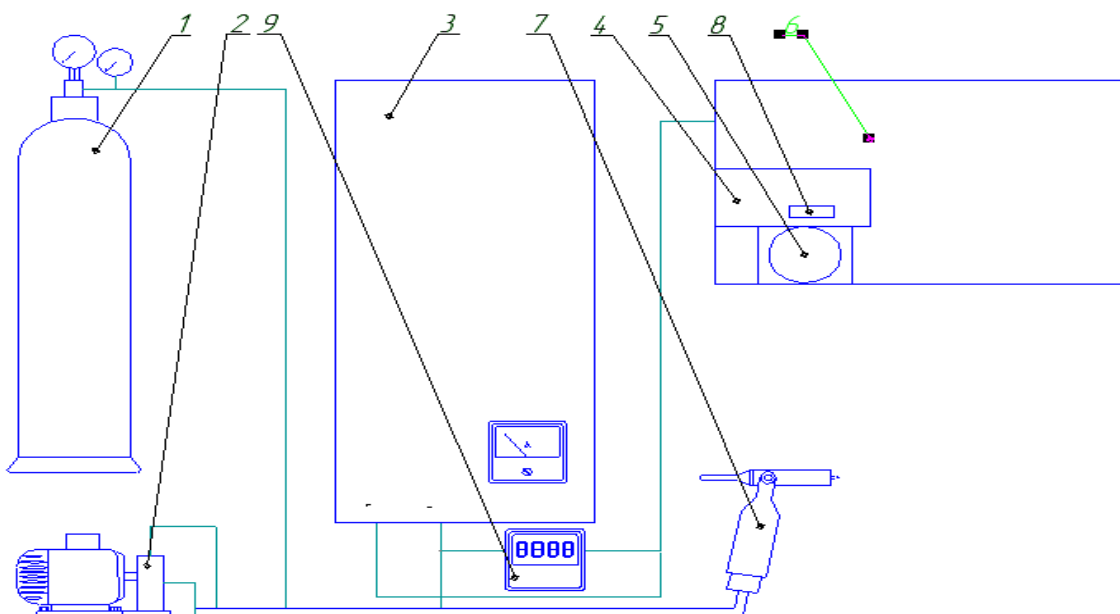


Рисунок 3.8 – Схема лабораторной установки для определения эффективной мощности сварочных источников теплоты калориметрическим методом.

Конструкция лабораторной установки состоит из следующих составляющих (рисунок 3.8, 3.9):

- 1-баллон с аргоном,
- 2-насосная станция для охлаждения горелки,
- 3- сварочный выпрямитель ВСВУ-400,
- 4- огнеупорная плита,
- 5- калориметр,
- 6 - рабочий стол,
- 7 - сварочная горелка,
- 8 - образец из Ст 3,
- 9 – мультиметр.



Рисунок 3.9 – Фотография рабочего места для проведения исследований

В качестве измерительных приборов используются:

- токовые клещи,
- цифровой мультиметр,
- манометр с ротаметром.

Подробнее опишем каждую составляющую лабораторной установки.

Аргон (Ar) – инертный негорючий и невзрывоопасный защитный газ, без цвета и запаха, обеспечивает защиту сварочной ванны от воздействия окружающей среды. Используется для сварки как плавящимся, так и неплавящимся электродом.

Баллон с аргоном серого цвета с зеленой надписью, находится в газообразном состоянии при давлении до 150 атмосфер, тяжелее воздуха, при сварке растекается по поверхности сварочной ванны и хорошо ее защищает. При нормальных условиях (20°C и 101,3 кПа) Аргон имеет плотность 1,66 кг/м<sup>3</sup>.

Аргон для сварки выпускают по ГОСТ 10157-79 трех сортов (в зависимости от содержания примесей): высшего, с содержанием не менее 99,99 %; первого, с содержанием 99,38 %, и второго, с содержанием 99,95 % аргона. Аргон высшего сорта рекомендуется для сварки активных металлов (титан, цирконий, ниобий) и их сплавов, первого сорта – для сварки сплавов на основе алюминия и магния, второго сорта – для сварки коррозионно-стойких, углеродистых и легированных сталей

Расход аргона регулируется с помощью манометра с ротаметром, расположенных на баллоне.

Для охлаждения горелки используется насосная станция.

Насосная станция изготовлена на кафедре «Сварка, обработка металлов давлением и родственные процессы».

Насосная станция состоит из двигателя ANTRIEBSTECHNIK (№ 75643227/107, 380 В, 280 об/мин), непосредственно самого насоса и емкости для охлаждения среды. В качестве охлаждающей среды использован тосол (антифриз, содержит различные присадки, которые способствуют незамерзанию и нескипанию жидкости при температурах, которые измеряются в данной лабораторной работе). Насосная станция соединяется с горелкой посредством специального шланга.

Одной из базовых частей конструкции лабораторной установки является источник питания постоянного тока - сварочный выпрямитель ВСВУ-400.

Выпрямитель универсальный для сварки неплавящимся электродом предназначен для питания установок автоматической, полуавтоматической и ручной электродуговой сварки обычной и сжатой непрерывной и импульсной (пульсирующей) дугой жаропрочных, нержавеющей сталей и титановых сплавов в аргоне.

Выпрямитель состоит из шкафа, трансформатора силового, дросселя сглаживающего, блока тиристорного, блока вентиляторов.

#### **Технические характеристики:**

|                                                                                                       |               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Номинальный сварочный ток при ПВ 60 % и длительности цикла 60 мин., А                                 | 400           |
| Диапазон регулирования сварочного тока при непрерывной сварке, тока импульса при импульсной сварке, А | 5±10%-400±10% |
| Диапазон регулирования дежурного тока, А                                                              | 5±10%-100±10% |
| Напряжение холостого хода, В                                                                          | не более 100  |
| Номинальное рабочее напряжение, В                                                                     | 30            |
| Потребляемая мощность, кВА                                                                            | не более 21   |
| Номинальное напряжение трехфазной питающей сети частотой 50 Гц, В                                     | 380±10%       |
| Габаритные размеры, мм                                                                                |               |
| длина                                                                                                 | не более 920  |
| ширина                                                                                                | не более 590  |
| высота                                                                                                | не более 800  |
| Масса, кг                                                                                             | не более 240  |

Условия эксплуатации соответствуют ГОСТ 15150-69.

Для уменьшения тепловых потерь теплопередачи материала рабочему столу применяется огнеупорная плита. Она изготовлена из шамота. Шамот - огнеупорная глина или каолин, обожжённые до потери пластичности, удаления химически связанной воды и той или иной степени спекания. Шамот получают обжигом (преимущественно при 1300—1500 °С) во вращающихся, шахтных или других печах исходного сырья в виде естественных кусков или брикетов, приготовленных на ленточных, вальцевых и других прессах. Степень спекания шамота характеризуется водопоглощением, которое обычно составляет от 2—3 до 8—10% (для «низкоожжённого» шамота 20—25%). После дробления и измельчения шамот применяют в качестве отошающего (уменьшение пластичности и усадки при сушке и обжиге) компонента шамотных масс при формовании изделий (или, соответственно, высокоглинозёмистых и других огнеупоров), изготовлении мертелей, торкрет-масс, в качестве заполнителя огнеупорных бетонов и т.д.

Целью проведения лабораторной работы является изучение и определение эффективной мощности сварочных источников теплоты и освоение калориметрического метода для исследования эффективности различных источников теплоты, поэтому еще одной базовой частью конструкции установки является калориметр (рисунок 3.10, 3.11), который состоит из:

**Крышки (1)** - детали, необходимой для разграничения сред, в полости крышки по всему диаметру проложен пенопласт;

**Калориметрического сосуда** – вакуумированной двустенной колбы, имеющей наружную (2) и внутреннюю (3) стенки из нержавеющей стали 12X18H9T;

**Термосопротивления ТСМ-50М (4),**

Диапазон измерений -50...+200°С, разрешающая способность 0,1°С.

Принцип работы ТСМ основан на зависимости электрического сопротивления металлов от температуры [22, с.121; 34]. ТСМ выполняют в

виде катушки из тонкой медной проволоки на каркасе из изоляционного материала, заключенной в защитную гильзу.

ТСМ характеризуются двумя параметрами:  $R_0$ -сопротивление датчика при  $0^\circ\text{C}$  и  $W_{100}$ - отношение сопротивления датчика при  $100^\circ\text{C}$  к его сопротивлению при  $0^\circ\text{C}$ .

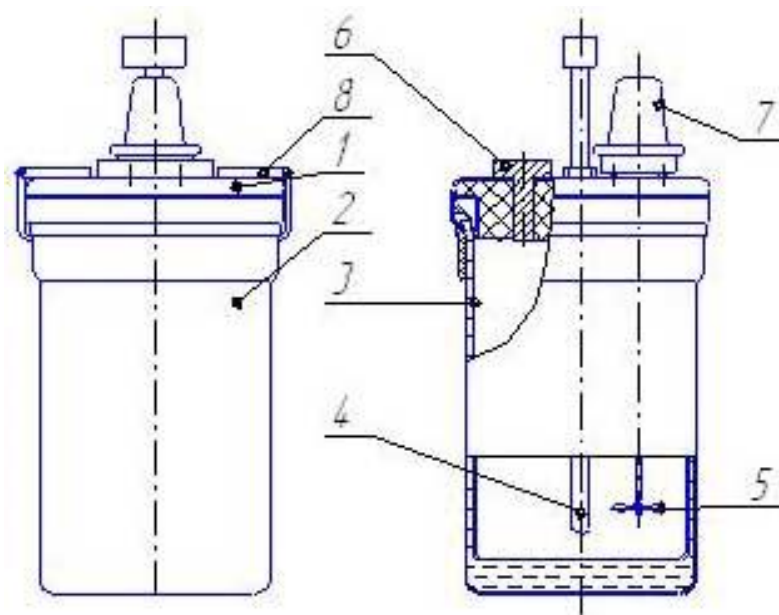


Рисунок 3.10 – Схема калориметра

**Мешалки** (5) – устройства, необходимого для перемешивания в калориметрическом сосуде жидкостей разных температур до состояния равновесия. Мешалка состоит из вала, жестко соединенного с валом электродвигателя, на валу мешалки прикреплена лопатка;

**Заглушки** (6) – детали, закрывающей отверстие для помещения образца внутрь калориметрического сосуда. Заглушка состоит из пенопласта.

Пенопласт - газонаполненный полимер, полученный путём вспенивания и последующего отверждения первоначально жидкой или пластично-вязкой композиции. Используют различные технологические приёмы вспенивания: механическое перемешивание, введение газообразователей (веществ, разлагающихся с выделением газа) или веществ, взаимодействующих с образованием газообразных продуктов; насыщение

исходной смеси газом под давлением с последующим снижением давления; введение жидкостей, быстро испаряющихся с повышением температуры. Пенопласт промышленного назначения выпускают главным образом на основе полистирола, поливинилхлорида, полиуретанов, полиэтилена, фенольных и эпоксидных смол. Коэффициент теплопроводности пенопласта ПСБ-С 0.042 - 0.039, плотность 15 - 50 кг/м<sup>3</sup>. На основании этих данных можно сделать вывод, что этот материал обладает выдающимися теплоизоляционными свойствами.

**Электродвигателя** коллекторного постоянного тока, 12 В (7) – устройства, запускающего в работу мешалку;

**Фиксатора** (8) – металлической детали для плотного закрепления крышки к калориметрическому сосуду;



Рис. 3.11 – Фотография калориметра и вторичного прибора ТРМ – 1.

### **Вторичного прибора: измеритель-регулятор одноканальный ОВЕН ТРМ-1**

Класс точности 0,5/0,25

Данный прибор применяют для измерения температуры с помощью датчиков:

- термопреобразователей сопротивления ТСМ,
- термопар ТХК,
- с унифицированным выходным сигналом тока 0 (4)...20 мА, 0...5 мА.
- Регулирование входной величины:
  - двухпозиционное регулирование,
  - аналоговое П-регулирование.

▪ Преобразование сигнала датчика для индикации реального значения

физической величины (масштабирование шкалы для аналогового входа, цифровая фильтрация).

- Программирование кнопками на лицевой панели.
- Сохранение заданных параметров при отключении питания.
- Защита параметров от несанкционированного измерения.

#### **Технические характеристики:**

Номинальное напряжение питания 220 В, 50 Гц

Допустимое отклонение номинального напряжения -15...+10 %.

Рабочий стол изготовлен из стали (Ст 3), на нем расположены огнеупорная плита, вторичный прибор измеритель-регулятор одноканальный ОВЕН ТРМ-1 и образец для нагрева.



Рисунок 3.12 – Калориметрируемый образец из Ст 3.

Также на рабочем столе сделан специальный крепеж под калориметр для удобства проведения работы.

Горелка предназначена для ручной сварки неплавящимся электродом в среде аргона малоуглеродистой стали на постоянном токе.

Конструкция горелки обеспечивает поворот головки в удобное для работы положение вокруг продольной оси рукоятки на угол  $\pm 180^\circ$ .

Горелка имеет кнопку дистанционного управления сварочным током и краник для регулирования расхода защитного газа. Подвод защитного газа и сварочного тока в горелках осуществляется отдельно.

Горелка обеспечивает высокое качество сварки, имеет небольшую массу и эффективную защиту рукоятки от перегрева.

Горелка имеет систему водяного охлаждения

Технические характеристики горелки предоставлены в (таблице 3.3).

Таблица 3.3 – Технические характеристики

| Показатели                              | Агни-03М        | Агни-03/07М | Агни-12М | Агни-16М |
|-----------------------------------------|-----------------|-------------|----------|----------|
| Ток сварки (ПВ-60 %):<br>Постоянный, А  | 200             | 180         | 200      | 180      |
| Кол-во осей поворота<br>головки горелки | 1               | 2           | 1        | 2        |
| Краник газа                             | есть            | есть        | нет      | нет      |
| Расход газа (аргона), л/мин             | 8-12            |             |          |          |
| Ток в цепи управления, А                | 2               |             |          |          |
| Диаметры электродов, мм                 | 1,6; 2; 3; 4; 5 |             |          |          |
| Диаметры сопел, мм                      | 8; 12,5         |             |          |          |
| Давление газа, кПа (кГ/см²)             | 147 (1,5)       |             |          |          |
| Габаритные размеры:                     |                 |             |          |          |
| Длина                                   | 230             | 250         | 210      | 230      |
| Высота головки, min<br><br>max          | 75              | 75          | 75       | 75       |
|                                         | 147             | 147         | 147      | 147      |
| Ширина (по кранику)                     | 45              | 45          | -        | -        |
| Диаметр рукоятки                        | 29              | 29          | -        | -        |
| Толщина                                 | -               | -           | 25       | 25       |
| Масса, кг (без шлейфа)                  | 0,25            | 0,3         | 0,23     | 0,28     |

Для измерения постоянного тока предназначены клещи токовые многофункциональные АКТАКОМ АТК-2200.

Таблица 3.4 – Диапазоны измерений клещей токовых

| Диапазон измерения | Разрешение | Предел допускаемой основной абсолютной погрешности |
|--------------------|------------|----------------------------------------------------|
|                    |            | Постоянный ток                                     |
| 0,5...200 А        | 0,1 А      | $\pm(0,015 I_{\text{изм}} + 5 \text{ епр})$        |
| 200...500 А        | 0,1 А      | $\pm(0,021 I_{\text{изм}} + 5 \text{ епр})$        |
| 500...2 000 А      | 0,1 А      | $\pm(0,021 I_{\text{изм}} + 5 \text{ епр})$        |

$I_{\text{изм}}$  – измеренное значение тока.

Для измерения напряжения постоянного тока применяется цифровой мультиметр серии М 890. Данный мультиметр разработан в соответствии со стандартами на электронные измерительные инструменты с категорией перегрузки (CAT II) и степенью загрязнения. Использовать мультиметр необходимо только с комплектными щупами.

Общие сведения:

Максимальное напряжение между выводами и землей - CAT II 1000 В, CAT II 600 В.

Метод контроля – АЦП двойного интегрирования.

Температура эксплуатации - 0°C – 40°C.

Размеры – 38x88x170 мм.

Масса – 340 г (включая элемент питания).

Особенности цифрового мультиметра:

- кнопочный выключатель ВКЛЮЧЕНИЕ-ВЫКЛЮЧЕНИЕ,
- 32-х позиционный поворотный переключатель для выбора функций и диапазона,
- высокая чувствительность 100 мкВ,
- автоматическая индикация полярности в диапазоне постоянного тока (DC),

- автоматическая индикация перегрузки с обозначением на дисплее «1»,
- все диапазоны защищены от перегрузок.

Таблица 3.5 – Напряжение постоянного тока

| Диапазон | Точность                                       | Разрешение |
|----------|------------------------------------------------|------------|
| 200 мВ   | $\pm 0,5 \%$ от предела диапазона $\pm 1$ знак | 100 мкВ    |
| 2 В      |                                                | 1 мВ       |
| 20 В     |                                                | 10 мВ      |
| 200 В    |                                                | 100 мВ     |
| 1000 В   |                                                | 1 В        |

Входное сопротивление: 10 Мом во всех диапазонах

Приспособления:

Щупы: НУТЛ-060

Элемент питания: 9 В NEDA 1604 или 6F22

Большое значение в проведении лабораторной работы № 1 имеют данные, полученные при работе с калориметром. От их точности зависит правильный результат определения эффективной мощности сварочных источников теплоты.

### 3.1.3. Калибровка калориметра

Процессы, происходящие в калориметрах, всегда сопровождаются переносом теплоты (теплопередачи), так как исследуемая система и прибор для измерения температуры разделены в пространстве. Основное уравнение теплопередачи связывает количество перенесенной теплоты с изменением объемной плотности энергии (закон охлаждения Ньютона-Рихмана):

$$\dot{Q} / A = \alpha (T_2 - T_1)$$

$\dot{Q}$  – тепловой поток,  $A$  – площадь поверхности, через которую происходит перенос теплоты,  $\alpha$  – поверхностный коэффициент теплопередачи,  $T_1$ ,  $T_2$  – начальная и конечная температура.

Теплопередача осуществляется путем теплопроводности, конвекции и излучения. Если два тела с различной температурой разделены газовой средой, теплообмен между ними происходит по всем механизмам одновременно.

Теплопроводность – это процесс теплообмена посредством переноса фотонов без какого-либо сопутствующего переноса массы потоком вещества или диффузией. Об истинной теплопроводности можно говорить только для твердых тел.

Конвекция означает перенос теплоты потоком жидкости или газа вследствие переноса массы вещества. Каждый элемент объема текущей среды переносит теплоту от поверхности с более высокой температурой к поверхности с более низкой температурой. Таким образом создается тепловой поток.

При калориметрических измерениях естественная конвекция представляет собой дополнительный источник погрешностей, которые не поддаются расчету, так как зависят от многих факторов (геометрических параметров, природы среды и т.д.).

Все тела, находящиеся в термодинамическом равновесии, излучают и поглощают тепло при сохранении нулевого энергетического баланса. Тепловое излучение зависит от температуры тела и от структуры его поверхности, способной к излучению и поглощению. В калориметрах потери тепла в результате излучения сильно зависят от температуры, даже если разность температур между калориметрической системой и оболочкой постоянна. Эти потери можно свести к минимуму при равенстве температур системы и оболочки.

Все вышеперечисленные явления переноса теплоты играют существенную роль в калориметрии. С одной стороны, наличие разности

температур вызывает тепловой поток и таким образом является причиной тепловых потерь, которые не могут быть учтены при калориметрических измерениях. С другой стороны, без градиента температур не может быть теплообмена.

Из-за тепловых потерь на нагревание калориметрического сосуда и других частей калориметра только часть теплоты расходуется на повышение температуры калориметрической жидкости.

Поэтому предварительным этапом проведения исследований является калибровка калориметра.

Калибровка необходима для определения водяного эквивалента и тепловых потерь в стенках калориметра.

Устройства и приспособления: лабораторная колба объемом 250 мл; измеритель-регулятор ТРМ 1; калориметр; нагревательный шкаф Heraeus 01910004; секундомер.

Порядок выполнения калибровки:

Помещаем образец из стали (Ст3) комнатной температуры в нагревательный шкаф, устанавливаем с помощью кнопок на панели нагревательного шкафа температуру 80°C. Дистиллированную воду объемом 250 мл заливаем в калориметр, плотно закрываем крышку калориметра с помощью фиксатора и измеряем температуру воды с помощью измерителя-регулятора ТРМ - 1. Когда на дисплее нагревательного шкафа появляется значение температуры равное 80°C, выдерживаем в нем образец 7-10 минут, после чего помещаем образец в калориметр. Плотно закрываем отверстие для помещения образца в калориметр заглушкой. Включаем мешалку и контролируем изменение температуры в калориметре с помощью вторичного прибора - измеритель-регулятор одноканальный ОВЕН ТРМ-1 - до установления стабильного значения температуры. Выключаем мешалку и фиксируем полученное значение.

Следующим этапом проведения калибровки является осушение внутренней стенки калориметрической колбы и образца. Далее проводим

аналогичные действия, но температура нагревательного шкафа должна достигать 160°C; 200°C; 220°C, 240°C. Полученные результаты заносим в (таблицу 3.6).

Таблица 3.6 – Сводная таблица результатов проведения исследований

| № опыта | Температура воды в калориметре до проведения опыта | Температура образца после его нагрева | Температура воды в калориметре после проведения опыта |
|---------|----------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------|
|         | T', °C                                             | T'', °C                               | T''', °C                                              |
| 1       | 17,6                                               | 80,0                                  | 20,6                                                  |
| 2       | 19,7                                               | 160,0                                 | 26,6                                                  |
| 3       | 18,9                                               | 200,0                                 | 27,8                                                  |
| 4       | 25,3                                               | 220,0                                 | 35,5                                                  |
| 5       | 24,0                                               | 240,0                                 | 36,5                                                  |

Производим расчет:

$$Q_k = Q_1 + A \cdot (T''' - T'),$$

$Q_k$  – количество теплоты, поглощенное калориметром, кДж,

$Q_1$  – количество теплоты, поглощенное водой, кДж,

$A$  – водяной эквивалент калориметра, кДж/°C,

$$Q_1 = c_v \cdot m_v \cdot \rho_v \cdot (T''' - T'),$$

$c_v$  – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг K);

$m_v$  – масса воды, г;

$\rho_v$  – плотность воды, кг/м³;

$T'$  – температура воды в калориметре до проведения опыта, °C,

$T'''$  – температура воды в калориметре после проведения опыта, °C,

$$Q_2 = c_{об} \cdot m_{об} \cdot (T'' - T'''), \quad Q_2 = Q_k,$$

$Q_2$  – количество теплоты, переданное образцом калориметру, кДж,

Расчет  $Q_2$  производим с учетом того, что температура образца, после того как его поместили в калориметр после нагрева, равна температуре воды в калориметре.

$c_{об}$  – удельная теплоемкость образца, кДж/(кг K);

$m_{06}$  – масса образца, г;

$T''$ - температура образца после его нагрева, °C,

$T'''$ - температура воды в калориметре после проведения опыта, °C,

Из вышесказанного делаем вывод, что  $Q_2 = Q_1 + A \cdot (T''' - T')$ ,

следовательно  $A = (Q_2 - Q_1) / (T''' - T')$ ,

$$1) T' = 19,7^\circ\text{C} \quad T'' = 160,0^\circ\text{C} \quad T''' = 26,6^\circ\text{C}$$

$$Q_1 = 4,187 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot (20,6 - 17,6) \cdot 998,95 = 3,137, \text{ кДж}$$

$$Q_2 = 0,130 \cdot 0,44 \cdot (80,0 - 20,6) = 3,397 \text{ кДж};$$

$$2) T' = 17,6^\circ\text{C} \quad T'' = 80,0^\circ\text{C} \quad T''' = 20,6^\circ\text{C}$$

$$Q_1 = 4,183 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot (26,6 - 19,7) \cdot 998,2 = 7,202 \text{ кДж}$$

$$Q_2 = 0,130 \cdot 0,44 \cdot (160,0 - 26,6) = 7,630 \text{ кДж};$$

$$3) T' = 18,9^\circ\text{C} \quad T'' = 200,0^\circ\text{C} \quad T''' = 27,8^\circ\text{C}$$

$$Q_1 = 4,183 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot (27,8 - 18,9) \cdot 998,2 = 9,290 \text{ кДж}$$

$$Q_2 = 0,130 \cdot 0,44 \cdot (200,0 - 27,8) = 9,849 \text{ кДж};$$

$$4) T' = 25,3^\circ\text{C} \quad T'' = 220,0^\circ\text{C} \quad T''' = 35,5^\circ\text{C}$$

$$Q_1 = 4,178 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot (35,5 - 25,3) \cdot 996,95 = 10,621 \text{ кДж}$$

$$Q_2 = 0,130 \cdot 0,44 \cdot (220,0 - 35,5) = 10,553 \text{ кДж};$$

$$5) T' = 24,0^\circ\text{C} \quad T'' = 240,0^\circ\text{C} \quad T''' = 36,5^\circ\text{C}$$

$$Q_1 = 4,178 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot (36,5 - 24,0) \cdot 996,95 = 13,016 \text{ кДж}$$

$$Q_2 = 0,130 \cdot 0,44 \cdot (240,0 - 36,5) = 11,640 \text{ кДж}.$$

После проведенных расчетов определяем  $A$ ,  $A$  - водяной эквивалент калориметра.

$$1. A_1 = (Q_2 - Q_1) / (T''' - T') = (3,397 - 3,137) / 3 = 0,086, \text{ кДж}/^\circ\text{C}$$

$$2. A_2 = (Q_2 - Q_1) / (T''' - T') = (7,630 - 7,202) / 6,9 = 0,062, \text{ кДж}/^\circ\text{C}$$

$$3. A_3 = (Q_2 - Q_1) / (T''' - T') = (11,640 - 13,016) / 12,5 = -0,11, \text{ кДж}/^\circ\text{C} -$$

случайная величина

$$4. A_4 = (Q_2 - Q_1) / (T''' - T') = (9,849 - 9,290) / 8,9 = 0,062 \text{ кДж}/^\circ\text{C}$$

$$5. A_5 = (Q_2 - Q_1) / (T''' - T') = (10,553 - 10,621) / 10,2 = -0,006 \text{ кДж}/^\circ\text{C} -$$

случайная величина

$$A = (A_1 + A_2 + A_4) / 3 = 0,07 \text{ кДж}/^\circ\text{C}.$$

Таким образом, водяной эквивалент калориметра составляет:  $A = 0,07$  Дж/°С.

### **3.1.4. Методика определения эффективной тепловой мощности сварочных источников теплоты калориметрическим методом**

1. Ознакомиться с описанием установки;
2. Заполнить калориметр 250 мл дистиллированной воды, плотно закрыть крышку калориметра с помощью фиксатора;
3. Измерить температуру в калориметре до проведения опыта,  $T_0$ ;
4. Установить сварочный ток на источнике питания ВСВУ - 400 ручкой регулировки на выбранное значение.
5. Калориметрируемый образец поместить на огнеупорную плиту;
6. Произвести нагрев образца из Ст 3 толщиной 3 мм аргонно-дуговой горелкой, фиксируя время нагрева  $t_r$ , сварочный ток  $I_{св}$ , напряжение  $U_{св}$ ;
7. После проведения нагрева немедленно поместить образец через специальное отверстие в калориметр, закрыть заглушку;
8. Включить мешалку. Контролировать температурные изменения до их стабилизации.
9. Выключить мешалку. Зафиксировать температуру после проведения опыта,  $T_k$ ;
10. Рассчитать  $\Delta T_v$ ,  $\Delta T_v = T_k - T_0$ ;
11. Рассчитать:
  - теплоту, поглощенную водой:  $Q_1 = \Delta T_v \cdot m_v \cdot c_v \cdot \rho_v$ ;
  - теплоту, поглощенную калориметром:  $Q_k = Q_1 + A \cdot \Delta T_v$ ;
  - теплоту, определяющую полный запас тепловой энергии образца до и после опыта:  $Q_{\Delta} = c_{об} \cdot m_{об} (T_k - T_v)$ ;
  - теплоту, теряемую на парообразование при погружении образца в калориметр:  $Q_{п} = 2608 \cdot m_{п}$ ;
  - теплоту, теряемую в окружающую среду при нагреве и переносе образца:

$$Q_T = \alpha \cdot q_{\text{и}} (t_{\text{г}}^2 + 2t_{\text{г}} \cdot t_{\text{п}}) / c_{\text{об}} \rho_{\text{об}} \delta_{\text{об}}$$

12. На основании полученных значений рассчитать эффективную тепловую мощность и эффективный КПД сварочных источников теплоты:

$$q_{\text{и}} = (Q_{\text{к}} + Q_{\Delta} + Q_{\text{п}}) / [t_{\text{г}} - \alpha (t_{\text{г}}^2 + 2t_{\text{г}} \cdot t_{\text{п}}) / c_{\text{об}} \rho_{\text{об}} \delta_{\text{об}}] \text{ и } \eta_{\text{и}} = q_{\text{и}} / I_{\text{св}} \cdot U_{\text{св}}.$$

13. Аналогичные действия произвести с различными значениями тока (3 значения), оставляя постоянными длину дуги и время нагрева образца.

14. На основании полученных данных построить графики зависимостей:

$$y(\Delta T) = f(I), y(q_{\text{и}}) = f(I), y(\eta_{\text{и}}) = f(I).$$

Рассмотрим пример определения эффективной тепловой мощности сварочных источников теплоты при работе с калориметром. Проведем 1 опыт и на основании полученных результатов построим график зависимостей.

Эффективная мощность сварочных источников теплоты определяется калориметрическим методом. Выражение для определения  $q_{\text{и}}$  получим из уравнения теплового баланса:  $Q = q_{\text{и}} \cdot t_{\text{г}} = Q_{\text{к}} + Q_{\Delta} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{т}}$ , Дж,

где  $t_{\text{г}}$  - время действия источника тепла, с,

$Q_{\Delta}$  – теплота, введенная в образец, кДж,

$Q_{\text{к}}$  – количество теплоты, поглощенное калориметром, кДж,

$Q_{\Delta}$  – теплота, определяющая полный запас тепловой энергии внутреннего состояния образца до и после опыта, кДж,

$Q_{\text{п}}$  – теплота, теряемая на парообразование при погружении образца в калориметр, кДж,

$Q_{\text{т}}$  – теплота, теряемая в окружающую среду при нагреве и переносе образца вследствие конвекции и радиации, кДж.

Для определения вышеуказанных теплоты проведем опыт:

Опыт №1

Заливаем в калориметр дистиллированную воду объемом 250 мл, плотно закрываем его крышкой с помощью фиксаторов и измеряем температуру воды, она равна  $T = 22,4$  °С. Температура калориметрируемого

образца до проведения опыта соответствует температуре окружающего воздуха  $T=22,4^{\circ}\text{C}$ .

С помощью ручки регулировки на источнике питания устанавливаем сварочный ток,  $I=60\text{ А}$ . Также необходимо зафиксировать напряжение, оно равно  $U=14\text{ В}$ . Помещаем калориметрируемый образец на огнеупорную плиту и производим его нагрев аргонно-дуговой горелкой в течение 10-12 секунд. После этого незамедлительно помещаем образец в калориметр. Включаем мешалку и контролируем изменение температуры в калориметре с помощью вторичного прибора - измеритель-регулятор одноканальный ОВЕН ТРМ-1 - до установления стабильного значения температуры. Выключаем мешалку и фиксируем полученное значение. Оно составляет  $T=26,6^{\circ}\text{C}$ . В ходе проведения опыта № 1 получаем значение  $\Delta T_{\text{в}}$  – разница температур воды в калориметре до и после проведения опыта:  $\Delta T_{\text{в}} = 26,6 - 22,4 = 4,2^{\circ}\text{C}$ .

Рассчитаем значение  $Q_1$ ,  $Q_1$ - количество теплоты, поглощенное водой:

$$Q_1 = \Delta T_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} \cdot m_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{в}} = 4,2 \cdot 4,201 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 999,8 = 4\,410\text{ кДж},$$

где  $c_{\text{в}}$  – удельная теплоемкость воды,  $\text{кДж}/(\text{кг К})$ ;

$m_{\text{в}}$  – масса воды, г;

$\rho_{\text{в}}$  – плотность воды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\Delta T_{\text{в}}$ - разница температур воды в калориметре до и после проведения опыта,  $^{\circ}\text{C}$

Далее производим расчет  $Q_{\text{к}}$ ,  $Q_{\text{к}}$  – количество теплоты, поглощенное калориметром,  $Q_{\text{к}} = Q_1 + A \cdot \Delta T_{\text{в}} = 4,410 + 0,07 \cdot 4,2 = 4,704\text{ кДж}$ ,

где  $A$  – водяной эквивалент калориметра,  $\text{кДж}/^{\circ}\text{C}$

Определим  $Q_{\Delta}$ ,  $Q_{\Delta}$  - теплота, определяющая полный запас тепловой энергии внутреннего состояния образца до и после опыта,  $\text{кДж}$ :  $Q_{\Delta} = c_{\text{об}} \cdot m_{\text{об}} \cdot (T_{\text{к}} - T_{\text{в}})$ , где  $c_{\text{об}}$  – удельная теплоемкость образца,  $\text{кДж}/(\text{кг К})$ ;

$m_{\text{об}}$  – масса образца после нагрева, г;

$T_{\text{к}}$ - температура воды после проведения опыта,  $^{\circ}\text{C}$

$T_B$ - температура образца до опыта, равная температуре окружающего воздуха, °C

$$Q_{\Delta} = c_{об} \cdot m_{об} \cdot (T_K - T_B) = 0,44 \cdot 0,235 \cdot (26,6 - 22,4) = 0,434 \text{ кДж.}$$

Следующим этапом является расчет  $Q_{п}$ ,  $Q_{п}$  – теплота, теряемая на парообразование при погружении образца в калориметр, кДж:  $Q_{п} = 2608 \cdot m_{п}$ , где  $m_{п}$  - масса испарившейся воды, г, 2608 – удельная теплота парообразования, кДж/г, значения  $Q_{п}$  в зависимости от тока сварочной дуги приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Влияние сварочного тока на потери теплоты при парообразовании

|                     |     |      |      |      |
|---------------------|-----|------|------|------|
| $I, A$              | 60  | 80   | 100  | 120  |
| $Q_{п}, \text{кДж}$ | 1,2 | 1,45 | 1,67 | 1,87 |

$$Q_{п} = 1,2 \text{ кДж}$$

$Q_T$  - потери теплоты на теплоотдачу в окружающую среду определяются как функция удельной энтальпии образца, которая за время горения дуги  $t_r$  считается возрастающей пропорционально величине  $t_r$ , а за время переноса образца в калориметр  $t_{п}$  для простоты подсчетов принимается постоянной.

$$Q_T = \alpha \cdot q_{и} (t_r^2 + 2t_r \cdot t_{п}) / c_{об} \rho_{об} \delta_{об},$$

где  $\alpha$  – коэффициент поверхностной теплоотдачи образца,  $\alpha = 4,18 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/см}^2 \text{с}^\circ\text{C}$ ,

$c_{об}$ - удельная теплоемкость образца, кДж/(кг K);

$\rho_{об}$ - плотность образца, кг/м<sup>3</sup>;

$\delta_{об}$  – толщина образца,  $\delta \text{ Ст } 3 = 0,3 \text{ см.}$

Подставим значение потерь  $Q_T$  в уравнение теплового баланса:

$Q = q_{и} \cdot t_r = Q_K + Q_{\Delta} + Q_{п} + \alpha \cdot q_{и} (t_r^2 + 2t_r \cdot t_{п}) / c_{об} \rho_{об} \delta_{об}$ , тогда эффективная тепловая мощность дуги  $q_{и} = (Q_K + Q_{\Delta} + Q_{п}) / [t_r - \alpha (t_r^2 + 2t_r \cdot t_{п}) / c_{об} \rho_{об} \delta_{об}]$ .

$$q_{и} = (4,704 + 0,434 + 1,2) / [12 - 4,18 \cdot 10^{-3} (12^2 \cdot 12 \cdot 2,5) / (0,44 \cdot 7,8 \cdot 0,3)] = 6,338 / 11,171 = 0,56 \text{ кВт.}$$

Следующий этап расчета является определение эффективного коэффициента полезного действия источника теплоты  $\eta_{и}$ .

$$\eta_{и} = q_{и} / I_{св} \cdot U_{св},$$

где  $I_{св}$  - ток сварки, А,

$U_{св}$  – напряжение сварки, кВ,

$$\eta_{и} = 0,56 / (60 \cdot 14 \cdot 10^{-3}) = 0,66 \text{ \%}.$$

В следующих опытах используем аналогичную методику, устанавливая следующие значения сварочного тока:  $I=80$  А,  $I=100$  А и  $I=120$  А. По полученным результатам для 4 опытов составим (таблицу 3.8).

Таблица 3.8 – Сводная таблица результатов проведения исследований

| № оп | $T_{в0}, ^\circ\text{C}$ | $T_{вк}, ^\circ\text{C}$ | $T_{об0}, ^\circ\text{C}$<br>$T_{об0} = T_{в},$ | $U_{св}$<br>В | $I_{св},$<br>А | $Q_1,$<br>кДж | $Q_к,$<br>кДж | $Q_{\Delta},$<br>кДж | $Q_{п},$<br>кДж | $q_{и},$<br>кВт | $\eta_{и},$<br>% |
|------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------|---------------|----------------|---------------|---------------|----------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| 1    | 22,4                     | 26,6                     | 22,4                                            | 14            | 60             | 4,410         | 4,704         | 0,434                | 1,2             | 0,56            | 0,67             |
| 2    | 23,3                     | 28,1                     | 20,0                                            | 14            | 80             | 5,040         | 5,376         | 0,837                | 1,45            | 0,68            | 0,81             |
| 3    | 24,6                     | 30,3                     | 20,0                                            | 14            | 100            | 5,985         | 6,384         | 1,065                | 1,67            | 0,81            | 0,87             |
| 4    | 21,2                     | 28,7                     | 20,0                                            | 14            | 120            | 7,875         | 8,4           | 0,899                | 1,87            | 0,83            | 0,88             |

где  $T_{в0}$  – температура воды в калориметре до проведения опыта,  $^\circ\text{C}$ ,

$T_{вк}$  – температура воды в калориметре после проведения опыта,  $^\circ\text{C}$ ,

$T_{об0}$  – температура образца до проведения опыта,  $^\circ\text{C}$ ,

$T_{в}$  – температура окружающего воздуха,  $^\circ\text{C}$ .

Построим графики зависимостей:

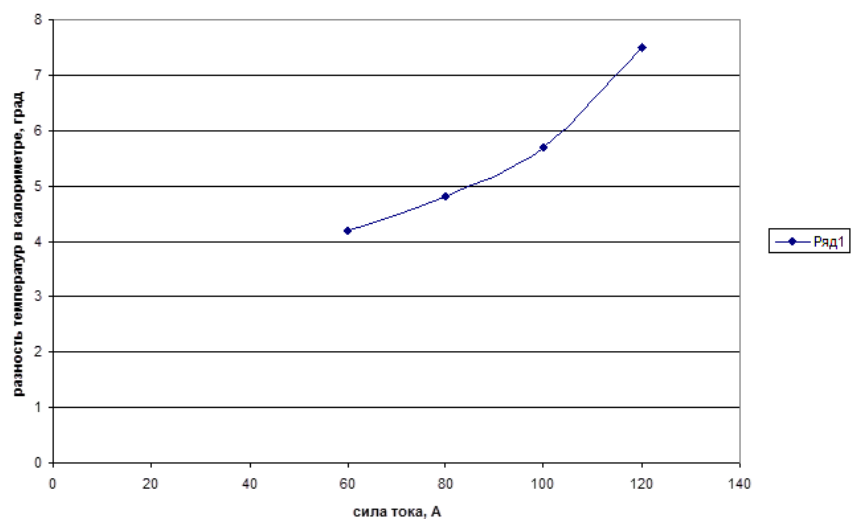


Рисунок 3.13 – График зависимости разности температур в калориметре от силы тока.

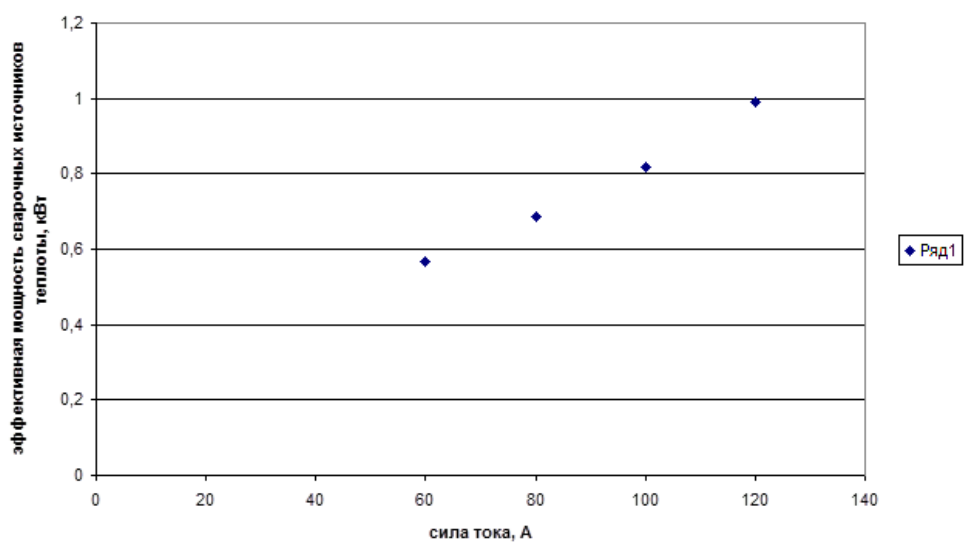


Рисунок 3.14 – График зависимости эффективной мощности сварочных источников теплоты от силы тока.

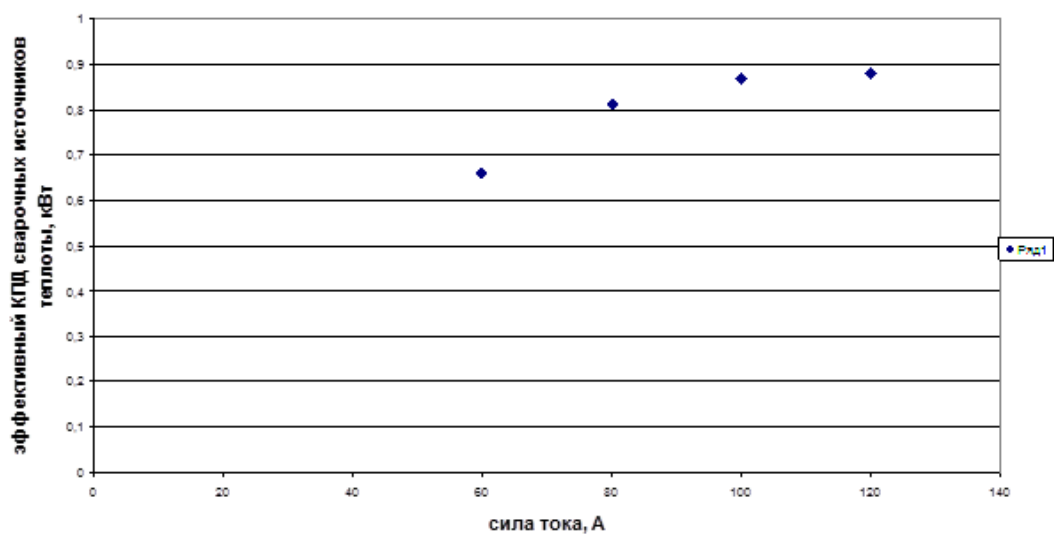


Рисунок 3.15 – График зависимости эффективного КПД сварочных источников теплоты от силы тока.

## 3.2 Разработка оборудования и методика определения теплоотвода в сопло плазмотрона прямого действия

### 3.2.1 Конструкция установки для определения теплоотвода в сопло плазмотрона от столба сжатой дуги

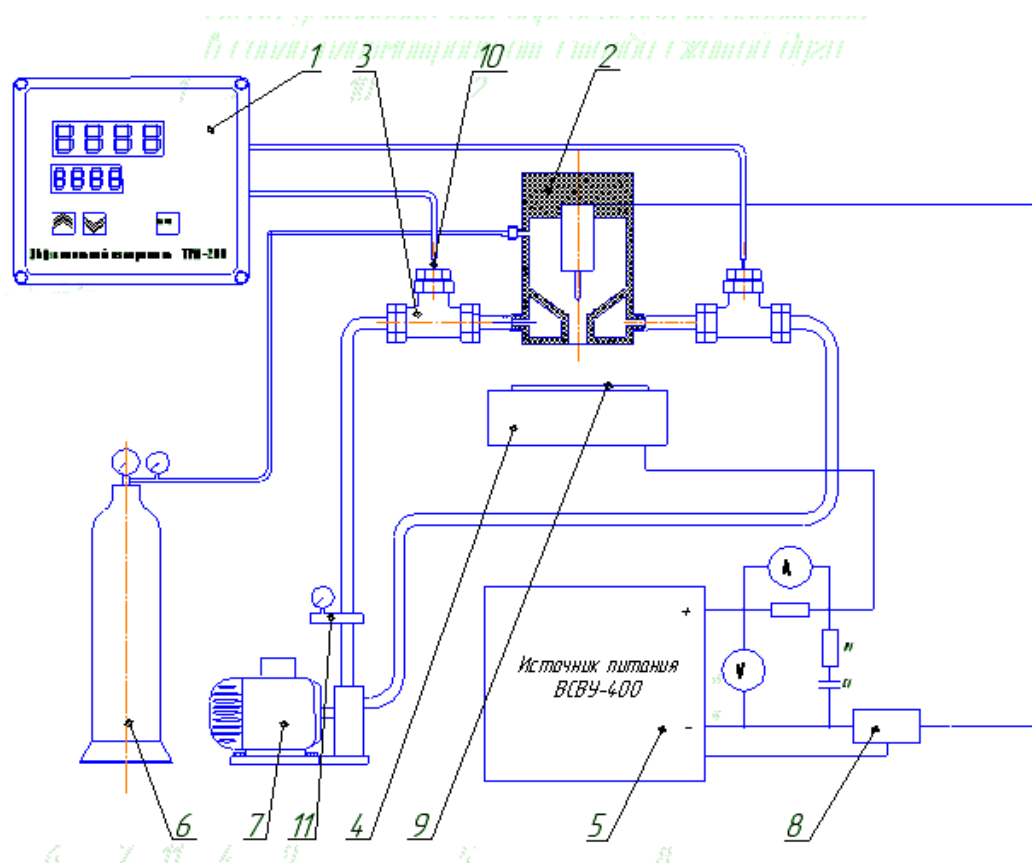


Рисунок 3.16 – Схема лабораторной установки для определения теплоотвода в сопло плазмотрона от столба сжатой дуги.

Установка состоит (рисунки 3.16-3.18) из сварочного выпрямителя ВСВУ – 400 (5), осциллятора (8) последовательного включения относительно сварочного выпрямителя. Осциллятор (генератор высокой частоты) – устройство, выдающее высокое напряжение от 2 000 до 10 000 В, частота осциллятора 200-1 000 кГц. Осциллятор применяется при сварке вольфрамовым электродом в аргоне, так как «короткое замыкание» недопустимо из-за возможного попадания вольфрама с электрода в

сварочную ванну, что приводит к вольфрамовым включениям в сварочном шве.



Рисунок 3.17 – Фотография рабочего места для проведения исследований



Рисунок 3.18 – Фотография плазмотрона, установленного на рабочем столе.

Также в установку входят следующие составляющие: баллон с аргоном (6), насосная станция для охлаждения плазмотрона (7), огнеупорная плита (9), рабочий стол (4), плазмотрон (2).

В качестве измерительных приборов используются: токовые клещи, цифровой мультиметр, манометр с ротаметром, водяной ротаметр.

Водяной ротаметр измеряет расход охлаждающей воды.

Все вышеперечисленные составляющие установки подробно рассмотрены в конструкции установки.

Подробнее остановимся на рассмотрении плазмотрона, работающего на прямой полярности.

Плазмотрон 6 ДЭ.394.517 предназначен для механизированной плазменной сварки и наплавки низколегированных сталей толщиной 3-8 мм на постоянном токе прямой полярности в среде углекислого газа, нержавеющей сталей толщиной 3-6 мм, меди и ее сплавов толщиной 3-6 мм на постоянном токе прямой полярности в среде инертных газов, алюминия и его сплавов толщиной 3-16 мм на постоянном токе обратной полярности в среде инертных газов.

Плазмотрон является устройством для создания и стабилизации сжатой электрической дуги, горящей между электродом плазмотрона и свариваемым изделием в потоке плазмообразующего и защитного газов.

#### **Технические характеристики:**

|                                           |            |
|-------------------------------------------|------------|
| Род тока                                  | постоянный |
| Номинальный сварочный ток, А              |            |
| - прямой полярности                       | 500        |
| - обратной полярности                     | 500        |
| Пределы регулирования сварочного тока, А  | 5-500      |
| Номинальная продолжительность вкл., ПВ, % | 100        |
| Охлаждение                                | водяное    |
| Расход охлаждающей воды при давлении      |            |

на входе 245 кПа (2,5 кг/см<sup>2</sup>), л/ч,

210

Плазмобразующий и защитный газ

Ar, He, Co<sub>2</sub>

Расход газа, л/ч

- плазмобразующего

50-260

- защитного

500-1 500

Диаметр присадочной проволоки, мм

- стальной

1,0-3,0

- алюминиевой и медной

2,0-3,0

Масса плазмотрона, кг

2,0

Плазмотрон состоит из следующих составных частей (рисунок 3.19, 3.20):

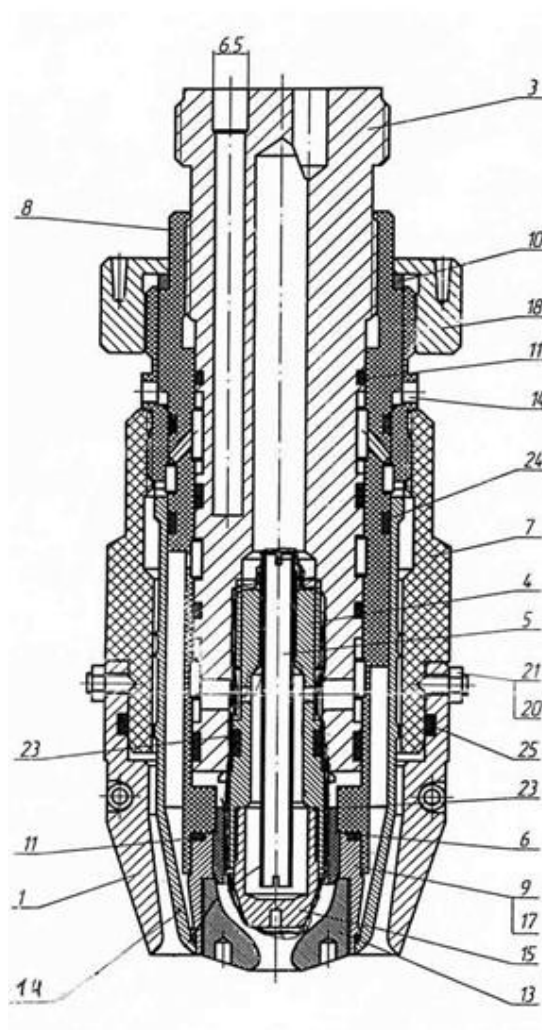


Рисунок 3.19 – Схема плазмотрона

|                           |                      |
|---------------------------|----------------------|
| - защитное сопло          | поз. 1               |
| - электрододержателей     | поз. 3 и 4           |
| - электрода               | поз. 15              |
| - плазмообразующего сопла | поз. 13              |
| - сопла                   | поз. 14              |
| - втулок                  | поз. 6, 7, 8 и 9     |
| - колец                   | поз. 10 и 16         |
| - гаек                    | поз. 18 и 19         |
| - штифта                  | поз. 17              |
| - трубки                  | поз 5                |
| - уплотняющих колец       | поз. 11, 23, 24 и 25 |

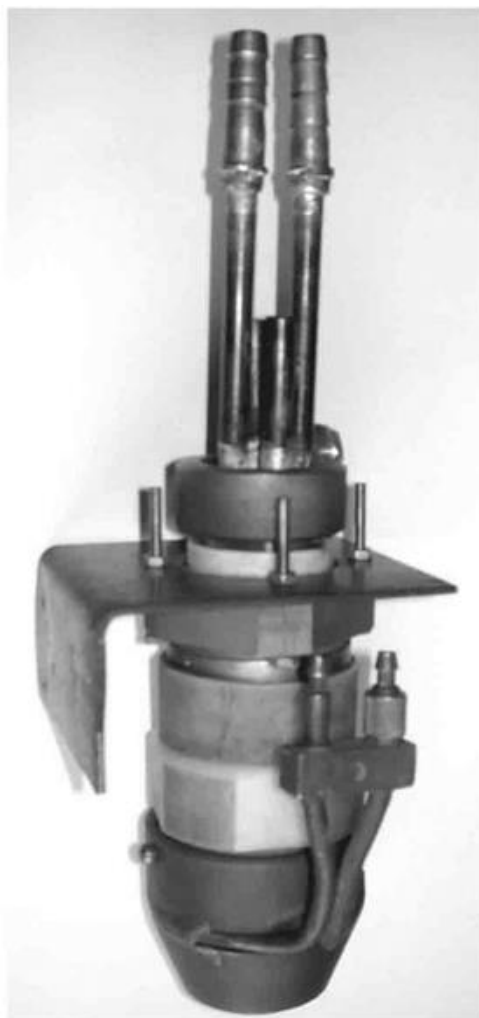


Рисунок 3.20 – Фотография плазмотрона

При плазменной сварке сжатие и стабилизация дуги производится потоком газа, проходящим совместно со столбом дуги через канал плазмообразующего сопла плазмотрона. Защита сварочной ванны осуществляется дополнительным потоком газа, проходящим в кольцевом зазоре между защитным соплом 1 и соплом 14.

Процесс плазменной сварки характеризуется стабильностью горения дуги, более высокой концентрацией тепловвода в изделие, большей универсальностью в выборе параметров режима сварки.

В исследование в качестве вторичного прибора используем двухканальный измеритель ОВЕН ТРМ – 200 (1).

Двухканальный измеритель типа ТРМ 200 совместно с входными датчиками (термопреобразователями или унифицированными источниками сигнала) предназначен для контроля различных технологических производственных процессов. Позволяет осуществлять следующие функции:

- измерения температуры и других физических величин (давления, влажности и т.п.) в двух различных точках с помощью стандартных датчиков;
- вычисление разности двух измеряемых величин ( $\Delta T = T_1 - T_2$ );
- отображение текущего значения измеряемых величин на встроенном светодиодном цифровом индикаторе.

Прибор конструктивно выполнен в пластмассовом корпусе, предназначенном для щитового или настенного крепления. Все элементы прибора размещены в двух печатных платах. На лицевой панели расположены клавиатура управления прибором, цифровой индикатор и светодиод, на задней – силовая и измерительные части, а также присоединительный клеммник.

Таблица 3.9 – Технические характеристики двухканального измерителя  
ОВЕН ТРМ – 200

| Наименование                                                                                                                                                               | Значение                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| <b>Питание</b>                                                                                                                                                             |                               |
| Напряжение питания                                                                                                                                                         | 90...245 В                    |
| Потребляемая мощность                                                                                                                                                      | 6 ВА                          |
| Частота                                                                                                                                                                    | 47...63 Гц                    |
| <b>Входы</b>                                                                                                                                                               |                               |
| Время опроса датчика                                                                                                                                                       | 1 с                           |
| Входное сопротивление прибора при подключении источника унифицированного сигнала<br>- тока (при подключении внешнего прецизионного резистора)<br>- напряжения, не менее    | 100 Ом $\pm 0,1$ %<br>100 кОм |
| Предел основной допустимой приведенной погрешности при измерении:<br>- термопреобразователем сопротивления<br>- термопарой<br>- унифицированных сигналов тока и напряжения | 0,25 %<br>0,5 %<br>0,5 %      |

На входе и выходе плазмотрона установлен тройник (3), зажимающий термопару хромель-копель (10). Диапазон измерений термопары ТХК (по ГОСТ Р 8.585-2001) составляет  $-200...+800^{\circ}\text{C}$ , разрешающая способность  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

Термопары – измерительные инструменты для определения очень малых разностей температур. Их используют во многих калориметрах. При температурах выше  $1\,300\text{ К}$  для абсолютного измерения температуры термопары обычно заменяют термометрами сопротивления (кроме платиновых), так как точность термопар при этих температурах снижается.

В данном разделе подробно описаны конструкции установок для проведения лабораторных работ с указанием технических характеристик составляющих частей. Лабораторная установка для определения эффективной мощности сварочных источников теплоты калориметрическим методом была прокалибрована. По результатам калибровки определили водяной эквивалент калориметра,  $A = 0,07\text{ кДж}/^{\circ}\text{C}$ .

Выполнен расчет по определению эффективной мощности сварочных источников теплоты по результатам проведения 4 опытов.

### 3.2.2 Методика по определению теплоотвода в сопло плазмотрона от столба сжатой дуги

1. Ознакомиться с описанием лабораторной установки;
2. Установить сварочный ток на источнике питания ВСВУ - 400 ручкой регулировки на выбранное значение;
3. Подать газ в плазмотрон. Зажечь вспомогательную (дежурную) дугу между электродом и соплом плазмотрона искровым разрядом от осциллятора. Под действием газа дежурная дуга образует струю плазмы небольшой мощности. При ее соприкосновении с деталью зажигается рабочая дуга.
4. С помощью водяного ротаметра проконтролировать объем воды, поступающей через тройник на вход плазмотрона.
5. За время работы плазмотрона путем проточного калориметрирования с помощью термопар ТХК, установленных в тройнике на входе и выходе плазмотрона, измерять температуру воды до ее стабилизации;
6. Занести полученные данные в таблицу 3.10.
7. Рассчитать мощность, отводимую в сопло плазмотрона:  $Q_c = (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})C_v$ .
8. Рассчитать средний тепловой потенциал аргона в канале, характеризующий среднюю температуру газа:  $Sc = Q_c / 8\pi l_c$ .
9. Рассчитать вольтоэквивалент напряжения, соответствующий мощности  $Q_c$ :  $U_q = Q_c / I_d$ .

Таблица 3.10 – Сводная таблица результатов проведения исследования

| № опыта | $d_c$ , мм | $l_c$ , мм | $I_d$ , А | $G_{\text{п}}$ , г/с | $G_{\text{в}}$ , г/с | $T_{\text{вх}}$ , °С | $T_{\text{вых}}$ , °С |
|---------|------------|------------|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
|         |            |            |           |                      |                      |                      |                       |

### 3.3 Разработка оборудования и методика исследования влияния режимов сварки плавлением на температурное поле

#### 3.3.1 Модернизация оборудования для исследования влияния режимов сварки плавлением на температурное поле

Стенд используется для измерения и регистрации тепловых полей при аргонодуговой сварки. 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 (рисунке 3.21).

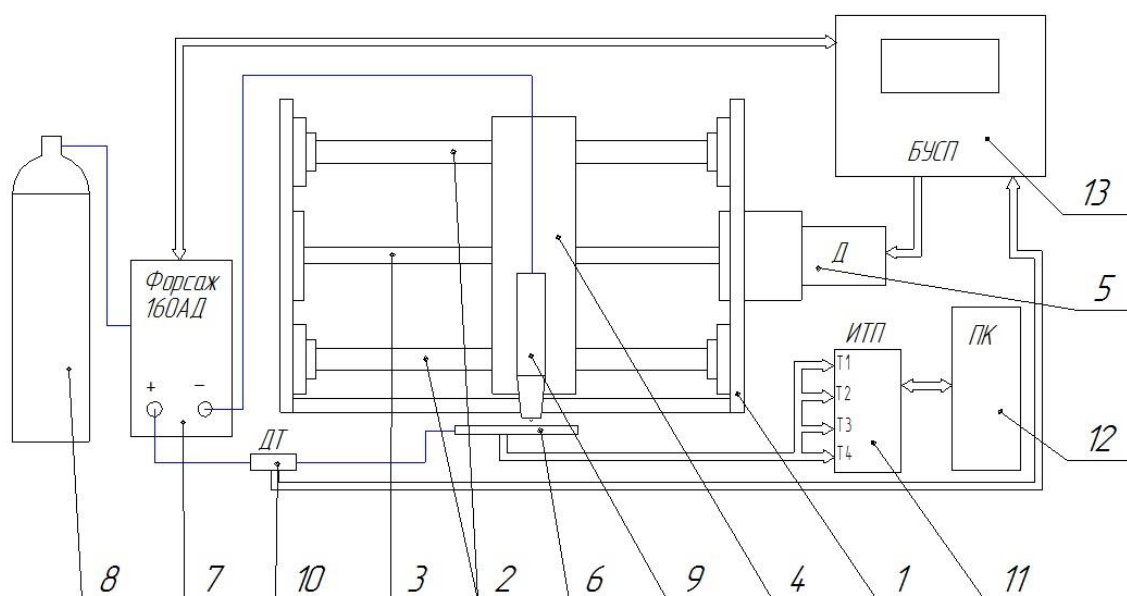


Рисунок 3.21 – Блочная схема установки по измерению тепловых полей:

- 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 (рисунке 3.22). Основными узлами являются поперечный портал с кареткой, на которой установлена аргонодуговая горелка с неплавящимся вольфрамовым электродом и программным блоком для задания режимов.

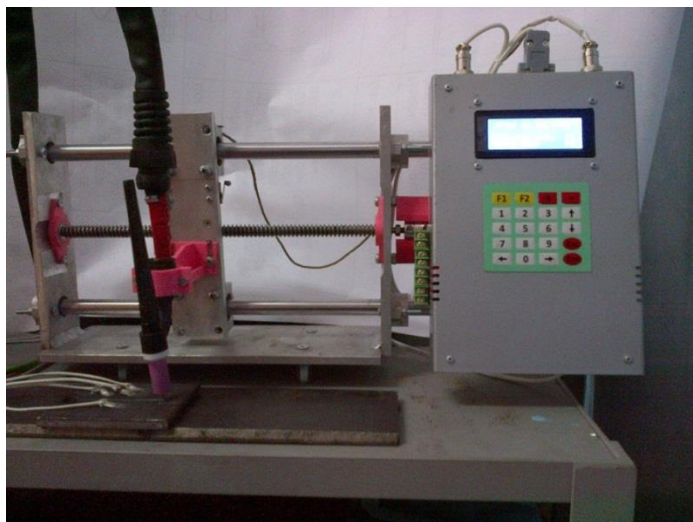


Рисунок 3.22 – Внешний вид установки.

Для формирования сварочной дуги используется сварочный аппарат Форсаж 160АД. Регулировка сварочного тока производится непосредственно с передней панели аппарата. В качестве защитного газа используется аргон. 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 адаптера термопары, для преобразования сигнала термопары в цифровое значение температуры. Arduino Mega построена на микроконтроллере ATmega2560.

Плата имеет 54 цифровых входа/выходов (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 кнопка перезагрузки. Для работы необходимо подключить платформу к компьютеру посредством кабеля USB.

**Краткие характеристики:**

|                                    |                                                        |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Микроконтроллер                    | ATmega2560                                             |
| Рабочее напряжение                 | 5В                                                     |
| Входное напряжение (рекомендуемое) | 7-12В                                                  |
| Входное напряжение (предельное)    | 6-20В                                                  |
| 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 KB (из которых 8 KB используются для загрузчика)   |
| ОЗУ                                | 8 KB                                                   |
| Энергонезависимая память           | 4 KB                                                   |
| Тактовая частота                   | 16 MHz                                                 |

Для регистрации с последующей записью в персональный компьютер и обработки данных в EXEL 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.

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| <b>SETUP OF THE MODE</b> |           |
| <b>Automatic mode</b>    | <b>F1</b> |
| <b>Manual mode</b>       | <b>F2</b> |

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.

Нажатием 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 « # ».

Нажатием на кнопку « \* » появляется следующее окно :

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

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

## Автоматический режим

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

- |                               |
|-------------------------------|
| <b>1 - Automatic on speed</b> |
| <b>2 - Automatic on time</b>  |

1 - Процесс наплавки будет происходить, при заданной скорости и заданной длинны сварочного шва.

2 – Процесс наплавки будет происходить при заданным временным интервалом сварочной точки.

**Процесс наплавки с заданной скорости и заданной длины сварочного шва.**

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

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

Вводим значение скорости сварки, например, скорость сварки будет 5 мм/сек, 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><b>Traverse speed</b><br/><b>5 mm/sec</b><br/><b>Relocation distance</b><br/><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, из меню 1.2., на клавиатуре « 2 » появляется экран для ввода времени длительности сварочной точки.

|                          |             |
|--------------------------|-------------|
| <b>Automatic on time</b> |             |
| <b>Arc time</b>          | <b>sek.</b> |
| <b>Voltage</b>           | <b>volt</b> |

С клавиатуры вводим значения 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       | 220В       |
| Потребляемая мощность    | 20кВа      |
| Сварочный ток            | 15-160А    |
| Защитный газ             | Аргон      |
| Скорость сварки          | 1-20мм/сек |
| Диапазон сварочной точки | 1-300 сек. |
| Тип термопар             | ТХА        |

### **3.3.2 Методика для исследования влияния режимов сварки плавлением на температурное поле**

1. Записать тип свариваемого материала (таблица 3.11), его толщину и ориентировочные размеры сварочной ванны, предложенные преподавателем.

2. Ознакомиться с порядком проведения работы на ЭВМ.

3. Исходя из свойств свариваемого материала, предложить способ его сварки (таблица 3.12) плавлением и ориентировочные режимы сварки: тепловую мощность источника, его КПД, ток сварки, напряжение дуги, скорость сварки, выбрать условия теплоотдачи по (таблице 3.13).

4. Оценить правильность выбранных Вами параметров режима сварки, например, ориентировочно по размеру области, нагретой выше температуры плавления свариваемого материала.

5. Для оценки размеров шва принять:

ширину сварочной ванны  $B_{ш} = [2...3]$ ;

наибольшую длину сварочной ванны  $L_{ш} = [3...4]$ ;

При этом следует учитывать и теплофизические свойства свариваемого материала [1].

Корректируя режимы сварки и теплоотдачи проанализировать графики зависимостей

$T = (x) \text{ при } y = \text{const};$

$T = (y) \text{ при } x = \text{const}.$

По полученным и откорректированным зависимостям построить изотерму  $T = T_{пл}$  заданного сплава, а также определить размеры зоны, нагретой выше указанной преподавателем температуры.

Таблица 3.11 – Перечень используемых в работе сплавов

| Тип сплава     | $\lambda, \text{Вт/см} \cdot \text{град}$ | $a, \text{см}^2/\text{с}$ | $c \cdot \gamma, \text{Дж/см}^3 \cdot \text{град}$ |
|----------------|-------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------|
| Сталь 3        | 0,397                                     | 0,080                     | 4,770                                              |
| АмГ6           | 1,520                                     | 0,530                     | 2,860                                              |
| ОТ4, ВТ20      | 0,083                                     | 0,040                     | 3,500                                              |
| Бериллий       | 1,780                                     | 0,410                     | 4,500                                              |
| Типа 18-8      | 0,200                                     | 0,360                     | 4,500                                              |
| Медь           | 3,720                                     | 0,940                     | 3,780                                              |
| Ст 30ХГСА      | 0,358                                     | 0,086                     | 4,140                                              |
| Ст 20Х13       | 0,200                                     | 0,360                     | 4,140                                              |
| Ст 12МХ        | 0,397                                     | 0,400                     | 4,500                                              |
| Технический Al | 2,520                                     | 0,880                     | 2,860                                              |
| На основе Ni   | 0,630                                     | 0,130                     | 4,800                                              |

Таблица 3.12 – Коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$  при различных условиях теплоотвода

| Величины,<br>характеризующие<br>эффективность<br>теплоотвода | Теплоотводящие прижимы   |             |                           |             |                           |               | Теплоотводящая<br>стальная<br>неохлаждаемая<br>плита |                 | Отдача<br>в<br>воздух |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------|---------------------------|-------------|---------------------------|---------------|------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------|
|                                                              | медные                   |             | алюминиевые               |             | Стальные                  |               |                                                      |                 |                       |
|                                                              | поверхность<br>травления |             | поверхность<br>обезжирена |             | поверхность<br>обезжирена |               |                                                      |                 |                       |
|                                                              | z=10<br>мм               | z=30<br>мм  | z=10<br>мм                | z=30<br>мм  | z=10<br>мм                | z=30<br>мм    | отдача                                               |                 |                       |
|                                                              |                          |             |                           |             |                           |               | 1 стор                                               | 2 стор          |                       |
| $\alpha \cdot 10^{-3}, \text{Вт/см}^2 \cdot \text{град}$     | 460-<br>545              | 356-<br>420 | 335-<br>420               | 293-<br>420 | 168-<br>210               | 29,3-<br>41,9 | 8,38-<br>12,00                                       | 12,00-<br>16-76 | 1,25-<br>2,5          |

Таблица 3.13 – Коэффициенты полезного действия различных дуговых способов сварки

| Вид сварки                                  | КПД, $\eta$ |
|---------------------------------------------|-------------|
| Под флюсом                                  | 0,80-0,95   |
| Ручная дуговая плавящимся электродом        | 0,65-0,85   |
| Угольным электродом                         | 0,50-0,70   |
| Вольфрамовым электродом в среде аргона      | 0,45-0,48   |
| Вольфрамовым электродом в среде гелия       | 0,48-0,52   |
| Плавящимся электродом в среде аргона        | 0,68-0,74   |
| Плавящимся электродом в среде $\text{CO}_2$ | 0,80-0,84   |

## **Заключение**

В ходе проведенной работы в проекте достигнуты следующие результаты:

1. Разработан схема блока управления приводом перемещения рабочего стола установки и схема визуализации процессов кристаллизации модельного расплава. На основании предложенного проекта модернизирована установка для исследования процессов кристаллизации сварочной ванны.

2. Разработана методика исследования процессов кристаллизации с учетом модернизированной установки для исследования процессов кристаллизации сварочной ванны

3. Предложена конструкция, изготовлена установка для исследования эффективной мощности сварочных источников теплоты калориметрическим методом. Для установки предложена оригинальная конструкция калориметра смешения. Проведена его калибровка.

4. Разработана методика по определению эффективной мощности сварочных источников теплоты калориметрическим методом

6. Разработана установка для определения теплоотвода в сопло плазматрона.

8. Разработана методика определения теплоотвода в сопло плазматрона прямого действия.

9. Разработан проект, подобрана элементная база и изготовлена установка для экспериментальных исследований процесса распределения тепла при сварке с неподвижным и движущимся источником тепла.

10. Разработана методика экспериментальных исследований процесса распределения тепла при сварке

## Список используемой литературы и используемых источников

1. 50 лет высшему сварочному образованию в Тольятти: очерки / В. В. Макасов [и др.]. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013. – 255 с.
2. Теория сварочных процессов : учебник для вузов / [В.М. Неровный и др.]; под ред. В.М. Нероного. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 702, [2] с.: ил.
3. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение: Учебник для машиностроительных вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – 493 с., ил.
4. Лившиц Л.С. Металловедение для сварщиков (сварка сталей). – М.: Машиностроение, 1979. – 253 с., ил.
5. Лейкин А. Е., Родин Б.И. Материаловедение. Учебник для машиностроит. специальностей вузов. М. «Высшая школа» 1971, 416 с. с илл.
6. Сидоров В.П. Теория и технология сварочных процессов : сборник задач для студентов специальности 150202 «Оборудование и технология сварочного производства». 2-е изд., исправл. / В.П. Сидоров. – Тольятти : ТГУ, 2009. – 228 с.
7. Балихин В. В., Быков В. В., Иванов Н. Ю. Технология ремонта машин и оборудования: Учебник для вузов. СПб.: СПбГЛТА, 2006. 524 с.
8. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке : [Учеб. пособие для машиностроит. вузов] / Н. Н. Рыкалин, проф. д-р техн. наук. - Москва : Машгиз, 1951. - 296 с.
9. Рыкалин Н.Н. Пространственное распределение температуры при дуговой сварке : монография / Н.Н. Рыкалин. – Москва ; Ленинград : Изд-во Акад. наук СССР, 1941. – 55 с.
10. Кархин В.А. Тепловые процессы при сварке. 2-е изд. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2015. 567 с.
11. Schleuss L., Springer K., Zoeke J. Qualifizierung von warmearmen MSG-Schweissverfahren für Leichtbaukonstruktionen mit strukturierten Halbzeugen // Join Ex Kongress, 10-11 Okt. 2012, Wien.

12. Malikov V., Ossenbrink R., Viehweger B. Experimental study of the change of stiffness properties during deep drawing of structured sheet metal // Journal of Materials Processing Technology. 2013. Vol.213. №11. P. 18111817.

13. Measuring the process efficiency of controlled gas metal arc welding processes / N. Pepe, S. Egerland, P. Colegrove, D. Yapp. Leonhartsberger A., A.Scotti // Science and Technology of Welding and Joining. 2011. Vol.16. №5. P. 412-417.

14. Seyffarth P., Meyer B., Scharff A. Grosser Atlas Schweiss-ZTUSchaubilder. Duesseldorf: DVS - Verlag, 1992. 176 s.

15. Березовский Б. М. Математические модели дуговой сварки том 1: математическое моделирование и информационные технологии, модели сварочной ванны и формирования шва / Б. М. Березовский. – Челябинск: ЮурГУ, 2002. – 584 с.

16. Березовский Б. М. Математические модели дуговой сварки том 2: математическое моделирование и оптимизация формирования различных типов сварных швов / Б. М. Березовский. – Челябинск: ЮурГУ, 2003. – 601 с.

17. Березовский Б. М. Математические модели дуговой сварки том 3 : давление дуги, дефекты сварных швов, перенос электродного металла / Б. М. Березовский. – Челябинск: ЮурГУ, 2003. – 485 с.

18. Зорин Н.Е., Зорин Е.Е. Материаловедение сварки. Сварка плавлением: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2016. – 164 с.

19. Банников Е.В. Сварка : Сварочные работы, современное оборудование, технологии дуговой и холодной сварки / Е. А. Банников. - Москва : АСТ : Кладезь, 2014. – 255 с.

20. Технология и оборудование сварки плавлением : лабораторный практикум / В.П. Сидоров [и др.] ; под ред. В.П. Сидорова и К.В. Моторина. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2017. – 392 с.

21. Физико-химические методы исследования металлургических процессов. Филиппов С.И., Арсентьев П.П., Яковлев В.В. Крашенинников М.Г. – Москва : Металлургия, 1968. – 552 с.

22. Линевер, Ф. Измерение температур в технике. М.: Металлургия, 1980. - 544 с.
23. Fritz, W., Poleck, H. Über die Fehler beim Messen und die praktische Beurteilung von Meßergebnissen. Arch. techn. Messen J 021 – 12, März 1965; J 021 – 13, April 1965; J 021 – 14, Mai 1965
24. Wagner, S.: Zur Behandlung systematischer Fehler bei der Angabe von Meßunsicherheiten. PTB – Mitteilungen 5 (1969), S. – 343 – 347.
25. Гольдштейн Р.В., Козинцев В.М., Куров Д.А., Попов А.Л., Челюбеев Д.А. Разработка метода определения сварочных напряжений по цветам побежалости // Изд-во ПГТУ, 2010. – 129 с.
26. Сапожков С.Б. Теория сварочных процессов. Лабораторный практикум: учебное пособие / С.Б. Сапожков, Е.А. Зернин, И.Р. Сабиров – Юрга: Изд-во Юргинского технологического института (филиала) Томского политехнического университета, 2007. – 96 с.
27. Сидоров В.П. Повышение энергоэффективности технологических процессов сварки : лабораторный практикум / В. П. Сидоров, И. В. Смирнов, А. И. Смирнова. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2015. - 1 оптический диск.
28. Банов М.Д. Сварка и резка материалов : Учебное пособие / М.Д. Банов, Ю.В. Казаков, М.Г. Козулин и др.; Под ред. Ю.В. Казакова. – М.: Издательский центр «Академия», 2002. – 400 с.
29. Лидин Р.А. Химические свойства неорганических веществ: Учебное пособие для вузов. 3-е изд., испр. /Р.А. Лидин, В.А. Молочко, Л.Л. Андреева; Под. Ред. Р.А. Лидина. – М.: Химия, 2000. 480 с.
30. Лидин Р.А. Реакция неорганических веществ : справочник / Р.А. Лидин, В.А. Молочко, Л.Л. Андреева : под. Ред. Р.А. Лидина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. :Дрофа, 2007. – 637 с.
31. Кирьянов К.В. Калориметрические методы исследования. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Современные методы исследования новых материалов электроники и

оптоэлектроники для информационно-телекоммуникационных систем». Нижний Новгород, 2007. – 76 с.

32. Калориметрия. Теория и практика: Пер. с англ./ В. Хеммингер, Г. Хене. – М.: «Химия», 1990. – Пер. изд.: ФРГ, 1984. – 176 с.

33. Колесов В. П. Основы термохимии : учебник / В. П. Колесов. - Москва: Изд-во МГУ, 1996. – 205 с.

34. Organisation Internationale de Metrologia legale, OIML – P3; Thermometres electriques a resistance de Platine-Cuivre-Nickel a usages teghniques, 1971.