

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ АБУ РАЙХАНА БЕРУНИ**

**МЕХАНИКО-МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**КАФЕДРА «МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИЯ СВАРОЧНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА»**

Абралов М.А.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к выполнению лабораторных работ  
по дисциплине «Тепловые основы сварочных процессов»  
для подготовки магистров по специальности  
5A522702 - «Оборудование и технология сварочного производства»**

**ТАШКЕНТ 2007**

УДК 621.791.1

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Тепловые основы сварочных процессов» для подготовки бакалавров по направлению для подготовки магистров по специальности 5А522702 «Оборудование и технология сварочного производства»/ ТашГТУ; Абралов Махмуд Абралович. Ташкент, 2007.

Составитель: проф., д.т.н. Абралов М.А.

Методические указания к выполнению лабораторных работ обсуждены и одобрены на заседании кафедры «Машины и технология сварочного производства».

Протокол № \_\_\_\_\_ от «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2007 г

Заведующий кафедрой: проф., д.т.н. Абралов М.А.

Методические указания к выполнению лабораторных работ рассмотрены и утверждены на заседании Методического Совета Механико-машиностроительного факультета:

Протокол № \_\_\_\_\_ от «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2007г

Председатель  
Методического Совета факультета: проф., д.т.н. Махкамов К.Х

**Содержание**

Лабораторная работа №1. Исследование процесса распространения тепла при точечном проплавлении тонкой пластины.....	4
Лабораторная работа №2. Исследование процесса распространения тепла при ручной дуговой сварке пластин встык...	6
Лабораторная работа №3. Исследование процесса распространения тепла при автоматической сварке пластин встык...	8
Лабораторная работа №4. Исследование процесса распространения тепла при автоматической наплавке на массивную плиту.....	11
Лабораторная работа №5. Исследование влияния ограниченности размеров тела на процесс распространения тепла.....	14
Список используемой литературы.....	16

## Лабораторная работа №1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА ПРИ ПРОПЛАВЛЕНИИ ТОНКОЙ ПЛАСТИНЫ

**Цель работы:** изучение температурного поля в тонкой пластине при воздействии неподвижного источника и влияния теплофизических свойств металла на характер распределения температур.

#### Содержание работы

Для описания процессов распространения тепла в нерасплавленном металле в зависимости от расстояния до сварного шва сварочные источники тепла подразделяют на два вида: сосредоточенные и местные распределенные.

Теория распространения тепла от сосредоточенных источников применима для характеристики процессов, происходящих при дуговой сварки в области низких температур (для стали до 800 — 1000°C), т. е. на некотором определённом расстоянии от дуги. Теория местных распределенных источников описывает процессы распространения тепла в области близкой к источнику при нагреве металла дугой, газовым пламенем и электрическим током с неравномерно распределенной плотностью. Удельный тепловой поток таких источников изменяется по нагреваемому участку поверхности или объему металла по закону нормального распределения.

При расчете распространения тепла используются аналитические и численные методы. Известные аналитические методы дают решения только для процессов, описываемых линейными дифференциальными уравнениями при линейных граничных условиях, т.е. для тех случаев, при которых теплофизические коэффициенты принимаются постоянными. Для расчета распространения тепла при сварке сталей теплофизические коэффициента металла  $\lambda$ ,  $c\gamma$ ,  $a$  принимают соответствующими температуре 400-600°C, коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  — соответствующим температуре 200-400°C.

Из аналитических методов расчета распространения тепла наиболее часто применяют метод Фурье, метод источников и операторный метод. Наиболее просто и удовлетворительно описывает распространение тепла при сварке метод источников. Численный метод расчета распространения тепла предусматривает замену дифференциального уравнения теплопроводности уравнением в конечных разностях.

Процесс распространения тепла при точечном проплавлении тонкой пластины на некотором удалении от дуги описывается схемой линейного мгновенного источника

$$T(r, t) = \frac{Q}{4\pi\lambda\delta t} \exp\left(-\frac{r^2}{4at} - bt\right) \quad (1.1)$$

где  $T(r, t)$  - температура пластины на расстоянии  $r$  от оси источника в момент времени  $t$ , °С;

$Q$  - количество тепла, внесенного в пластину источником, Дж;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Дж/(см·сек·°С);

$\delta$  — толщина пластины, см;

$a = \frac{\lambda}{c\gamma}$  — коэффициент температуропроводности, см<sup>2</sup>/сек;

$c\gamma$  — объемная теплоемкость, Дж/(см<sup>3</sup>·°С);

$b = \frac{2\alpha}{c\gamma\delta}$  — коэффициент теплоотдачи, сек<sup>-1</sup>;

$\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, Дж/(см·сек·°С).

Процесс распространения тепла при точечном проплавлении тонкой пластины вблизи от дуги описывается схемой мгновенного нормально-кругового источника:

$$T(r, t) = \frac{Q}{4\pi\lambda\delta(t+t_0)} \exp\left(-\frac{r^2}{4a(t+t_0)}\right) \quad (1.2)$$

$t_0$  — постоянная времени при нагреве металла, сек.

Постоянная времени зависит от типа дуги, силы тока и коэффициента температуропроводности металла  $a$ . Для стали постоянная времени  $t_0 = 0,6 — 3,5$  сек.

### Оборудование и материалы

1. Электронные автоматические потенциометры ЭПП—09М3.
2. Термопары.
3. Сварочный пост для автоматической аргодуговой сварки неплавящимся электродом.
4. Пластины из алюминия и нержавеющей стали толщиной 1,0 мм.

### Порядок выполнения работы

1. Приварить термопары с тыльной стороны пластины на расстоянии 2, 5, 10, 20 и 40 мм от оси электрода.
2. Проплавить пластины вольфрамовым электродом в среде аргона и одновременно записать термические циклы различных точек пластин. Режимы проплавления занести в таблицу 1.1.

Таблица 1

Режимы проплавления пластин

$I_{CB}, A$	$U_{д}, B$	$t_{CB}, сек$	$\eta$

3. Сравнить термические циклы одноименных точек пластин алюминия и нержавеющей стали. Выявить влияние теплофизических свойств металла на процесс распространения тепла.

4. По формулам (1.1) в (1.2) вычислять температуры точек пластины в различные моменты времени и по ним построить термические циклы. При вычислениях значения коэффициентов теплофизических свойств взять из значение из таблицы 1.2.

Таблица 1.2

## Значения коэффициентов теплофизических свойств

Материал	$T_{ср}, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{ кал}/(\text{см}\cdot\text{сек}\cdot^\circ\text{C})$	$c_p, \text{ кал}/(\text{см}^3\cdot^\circ\text{C})$	$a, \text{ см}^2/\text{сек}$
алюминий	600	0,65	0,65	1,0
нержавеющая сталь	300	0,06	1,13	0,053

Сравнить экспериментальные термические циклы с расчетными.

**Содержание отчета**

Отчет должен включать описание экспериментов, расчеты температур, экспериментальные и расчетные термические циклы, выводы по работе.

**Контрольные вопросы**

1. Как рассчитывается распространение тепла при сварке?
2. Какие схемы нагреваемого тела используются при сварке?
3. Как классифицируют схемы источников теплоты?
4. Какой схемой описывается распространение тепла при точечном проплавлении пластины?
5. Чем объясняется расхождение экспериментальных термических циклов с расчетными?
6. Как влияют теплофизические свойства металлов на распространение тепла при сварке?

**Лабораторная работа №2****ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ПЛАСТИН ВСТЫК**

**Цель работы:** изучение температурного поля в пластине при ручной дуговой сварке

**Содержание работы**

Процесс распространения тепла при ручной дуговой сварке встык описывается схемой линейного подвижного источника тепла и плоского температурного поля.

Предельное состояние процесса распространения тепла при нагреве пластины подвижным линейным источником выражается уравнением:

$$T(r, x) = \frac{Q}{2\pi\lambda\delta} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) K_0\left(r\sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}\right) \quad (2.1)$$



Для других точек пластины показания температуры занести соответственно в таблицы 2.2б— 2.2д. Форма записи аналогична таблице 2.2а.

8. По формуле (2.1) вычислить температуры точек пластины для различных мгновенных положений источника тепла. Результаты вычислений занести в таблицы 2.2а—2.2д. При вычислениях значения коэффициентов теплофизических свойств взять из таблицы 2.3

Таблица 2.3.

Значения коэффициентов теплофизических свойств для малоуглеродистой стали

Тср, °С	$\lambda$ , кал/(см·сек·°С)	$c$ , кал/(г·°С)	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	$c\gamma$ , кал/(см <sup>3</sup> ·°С)	$a$ , см <sup>2</sup> /сек	$\alpha$ , кал/(см <sup>3</sup> ·сек·°С)	$b$ , сек <sup>-1</sup>
400	0,09	0,16		1,25	0,06	$8 \cdot 10^{-4}$	$\frac{12,8 \cdot 10^{-4}}{8}$

Сравнить вычисленные значения температур с экспериментальными.

### Содержание отчета

Отчёт должен включать описание экспериментов, результаты измерений и вычислений, выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Какой схемой описывается процесс распространения тепла при ручной дуговой сварке?
2. Почему существует расхождение между экспериментально определенными температурами и расчетными для точек расположенных вблизи шва?
3. Можно ли в данной работе использовать другую схему источника тепла?

### Лабораторная работа №3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКЕ ПЛАСТИН ВСТЫК

**Цель работы:** изучение температурного поля в пластине при автоматической сварке.

### Содержание работы

Процесс распространения тепла при автоматической сварке пластин встык описывается схемой линейного быстродвижущегося источника и плоского температурного поля.

Уравнение предельного состояния процесса распространения тепла при нагреве пластины мощным быстродвижущимся источником имеет вид:

$$T(y_0, t) = \frac{q}{v\delta\sqrt{4\pi\lambda c\gamma t}} \exp\left(-\frac{y_0^2}{4at} - bt\right) \quad (3.1)$$

где  $T(y_0, t)$  - температура пластины на расстоянии  $y_0$  от оси шва в момент времени после прохождения дугой соответствующего поперечного сечения, °С;

$q$  – эффективная тепловая мощность дуги, Дж/сек.

Максимальная температура точки пластины на расстоянии  $y_0$  от оси шва выражается уравнением

$$T_m(y_0) = \frac{0,484}{2v\gamma\delta y_0} \left(1 - \frac{by_0^2}{2a}\right) \quad (3.2)$$

Время наступления максимальной температуры  $t_m$  определяется по формуле:

$$t_m = \frac{-2a \pm \sqrt{4a^2 - 16aby_0^2}}{8ab} \quad (3.3)$$

Скорость охлаждения оси шва при однопроходной сварке листов встык без учета теплоотдачи боковых поверхностей ( $b=0$ ) вычисляется по формуле

$$w = 2\pi\lambda c\gamma \frac{(T - T_0)^3}{(q/vs)^2} \quad (3.4)$$

где  $T$ — мгновенная температура рассматриваемой точки оси шва, °С;

$T_0$  - начальная температура листов, равная температуре окружающей среды или температуре предварительного подогрева °С.

### Оборудование и материалы

1. Сварочный пост для автоматической дуговой сварки
2. Термопары
3. Стенд с пирометрическими милливольтметрами МПШПр—54М и секундомером
4. Пластины из малоуглеродистой стали

### Порядок выполнения работы

1. Приварить или зачеканить термопары с тыльной стороны пластин на расстоянии 3, 5, 10, 20 и 40 мм от кромки по линии, перпендикулярной к кромкам в среднем сечении образцов.

2. Осуществить автоматическую сверку пластин встык. Режимы сварки занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1.

Режимы сварки			
$I_{CB}, A$	$U_{дз}, B$	$v, \text{см/сек}$	$\eta$

В момент прохождения дугой поперечного сечения, в котором установлены термопары, включить секундомер и начать снимать

показания с пирометрических милливольтметров. Полученные значения температур вписать в таблицу 3.2.

Таблица 3.2.

Температура точек пластины

t, сек	0	3	5	10	15	25	40	60	100	180	300
$T_{1\text{эксп}}, ^\circ\text{C}$											
$T_{1\text{расч}}, ^\circ\text{C}$											
$T_{2\text{эксп}}, ^\circ\text{C}$											
$T_{2\text{расч}}, ^\circ\text{C}$											

По полученных данным построить кривые распределения температур в моменты времени  $t = 3, 5, 10, 15, 25, 40, 60, 100, 180, 300$  сек, а также кривые, изменения температуры в точках установки термопар. По последним кривым определить значения максимальных температур в поперечном сечении и время их наступления.

Таблица 3.3

Максимальные температуры и время их наступления

№ точек установки термопар	1	2	3	4	5
$T_{m\text{эксп}}, ^\circ\text{C}$					
$T_{m\text{расч}}, ^\circ\text{C}$					
$t_{m\text{эксп}}, ^\circ\text{C}$					
$t_{m\text{расч}}, ^\circ\text{C}$					

По данных таблицы 3.3 построить кривую максимальных температур в поперечном сечении.

Построить кривую максимальных температур в поперечном сечении для произвольных точек, используя цвета побежалости (таблица 3.4)

Таблица 3.4

Определение температур по цветам побежалости

Цвет	Температура, $^\circ\text{C}$
Светложелтый	225
Темножелтый	240
Светлобурый	255
Бурый	265
Пурпурнокрасный	275
Фиолетовый	285
Темносиний	295
Светлосиний	310
Серый	325

3. По формуле (3.1) вычислить температуры точек пластины в различные моменты времени. Результаты вычислений внести в таблицу 3.2. Сравнить вычисленные значения температур с экспериментальными. По данным вычисления построить кривые изменения температур для

различных точек и кривые распределения температур для различных моментов времени.

4. По формулам (3.2) и (3.3) вычислить максимальные температуры в поперечном сечении для различных точек и время их наступления. Результаты вычисления внести в таблицу 3. Сравнить результаты вычислений с экспериментальными данными.

5. По формуле (3.4) рассчитать скорость охлаждения оси шва при различных мгновенных температурах точек и начальных температур пластины. Результаты вычислений внести в таблицу 3.5.

Таблица 3.5

Скорости охлаждения оси шва, °С/сек

Начальная температура пластины, °С	Мгновенная температура точек, °С			
	1200	900	700	400
20				
100				
200				

Определить влияние температуры подогрева пластин на скорость охлаждения шва.

### Содержание отчета

Отчет должен включать описание экспериментов, результаты измерений и вычислений, выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Можно ли процесс распространения тепла при автоматической сварке пластин встык описать схемой линейного подвижного источника?
2. Почему по мере удаления от оси шва уменьшается расхождение между экспериментальными и расчетными данными температур?
3. В чем сущность связи цвета побежалости с температурой нагрева?
4. Какими способами можно регулировать скорость охлаждения металла шва и околошовной зоны?

### Лабораторная работа №4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАПЛАВКЕ НА МАССИВНУЮ ПЛИТУ

**Цель работы:** изучение температурного поля в массивном теле и расчет скоростей охлаждения наплавленного валика.

### Содержание работы

Процесс распространения тепла при автоматической наплавке на массивную плиту может быть описан схемой точечного быстродвижущегося источника на поверхности полубесконечного тела.

Для предельного состояния процесса распространения тепла быстро движущегося мощного источника в полубесконечном теле справедливо уравнение:

$$T(y_0, z_0, t) = \frac{q}{2\pi\lambda vt} \exp\left(-\frac{y_0^2 + z_0^2}{4at}\right) \quad (4.1)$$

где  $T(y_0, z_0, t)$  — температура точки тела с координатами  $(y_0, z_0)$  в момент времени  $t$  после прохождения дугой соответствующего поперечного сечения, °С.

$q$  — эффективная тепловая мощность дуги, Дж/сек.

При расчете по формуле (4.1) каждая поперечная плоскость полубесконечного тела имеет свое начало отсчета времени.

Максимальная температура точки массивного тела на расстоянии  $r_x$  ( $r_x = \sqrt{y_0^2 + z_0^2}$ ) от оси шва определяется уравнением:

$$T_m(r_x) = \frac{0,368q}{\frac{\pi}{2}vc\gamma r_x^2} \quad (4.2)$$

Время наступления максимальной температуры вычисляется по формуле:

$$t_m = \frac{r_x^2}{4a} \quad (4.3)$$

Скорость охлаждения  $w$  оси валика при наплавке на массивное тело выражается уравнением

$$w = 2\pi\lambda \frac{(T - T_0)^2}{q/v} \quad (4.4)$$

где  $T$  — мгновенная температура точки, вызванная процессом распространения тепла сварочной дугой, °С;

$T_0$  — начальная температура изделия равная температуре окружающей среды или температуре предварительного подогрева, °С

### Оборудование и материалы

1. Сварочный пост для автоматической дуговой наплавки
2. Термопары
3. Стенд с пирометрическим милливольтметром МПШПр-54М и секундомером.
4. Массивная плита из малоуглеродистой стали

### Порядок выполнения работы

1. С тыльной стороны плиты на различной глубине зачеканить термопары в плоскости, перпендикулярной к оси предполагаемой наплавки в среднем сечении.

2. Начать автоматическую наплавку валика на массивную плиту. Режимы наплавки занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1.

## Режимы сварки

$I_{св}, A$	$U_{д}, B$	$v, см/сек$	$\eta$

В момент прохождения дугой поперечного сечения, в котором установлены термопары, включить секундомер и начать снимать показания пирометрического милливольтметров. Полученные значения температур записать в таблицу 4.2.

Таблица 4.2.

## Температура точек плиты

t, сек	0	3	5	10	15	25	40	60	100	180	300
$T_{1эксп}, ^\circ C$											
$T_{1расч}, ^\circ C$											
$T_{2эксп}, ^\circ C$											
$T_{2расч}, ^\circ C$											

По полученным данным построить кривые изменения температуры в точках установки термопар и по ним определить значения максимальных температур в поперечном сечении и время их наступления. Результаты вписать в таблицу 4.3.

Таблица 4.3

## Максимальные температуры и время их наступления

№ точек установки термопар	1	2	3	4	5
$T_{m эксп}, ^\circ C$					
$T_{m расч}, ^\circ C$					
$t_{m эксп}, ^\circ C$					
$t_{m расч}, ^\circ C$					

Построить кривую максимальных температур в плоскости наплавки в направлении перпендикулярном оси валика.

3. По формуле (4.1) вычислить температуры точек массивной плиты в различные моменты времени. Результаты занести в таблицу 4.2. По данным вычисления построить кривые изменения температур для различных точек. Сравнить вычисленные значения температур с экспериментальными.

4. По формулам (4.2) и (4.3) вычислить максимальные температуры в поперечном сечении для различных точек и время их наступления. Результаты расчетов вписать в таблицу 4.3. Сравнить результаты вычислений с экспериментальными данными.

5. Используя формулу (4.4), рассчитать скорость охлаждения оси наплавленного валика при различных мгновенных температурах точек и начальных температурах массивной плиты. Результаты вычислений внести в таблицу 4.4.

Таблица 4.4

Скорости охлаждения оси шва,  $^\circ C/сек$

Начальная температура пластины, °С	Мгновенная температура точек, °С					
	1300	1100	900	700	500	300
20						
100						
200						
300						

Выявить влияние начальной температуры на скорость охлаждения оси наплавленного валика

### Содержание отчета

Отчет должен включать описание экспериментов, результаты измерений и вычислений, выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Какой схемой можно описать процесс распространения тепла при автоматической наплавке на массивное изделие?
2. Как влияет скорость наплавки на скорость охлаждения валика?
3. Как влияет мощность дуги на скорость охлаждения наплавленного валика?

### Лабораторная работа №5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОГРАНИЧЕННОСТИ РАЗМЕРОВ ТЕЛА НА ПРОЦЕСС РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА

**Цель работы:** изучение температурных полей в телах ограниченных размеров.

### Содержание работы

Реальные изделия всегда имеют ограниченные размеры. Поэтому процесс распространения тепла в них по сравнению с неограниченными телами (полубесконечными, пластинами и стержнями) происходит по иному. В неограниченных телах граничные поверхности можно считать при некоторых допущениях не пропускающими тепла. Вследствие этого температура точек реального изделия превышает температур, вычисленную по схеме неограниченного тела.

Процесс распространения тепла в изделиях ограниченных по глубине, ширине и длине описывается теорией фиктивных источников нагрева.

### Оборудование и материалы

1. Сварочный пост для автоматической дуговой сварки
2. Термопары
3. Стенд с пирометрическими милливольтметрами и секундомером
4. Пластины из малоуглеродистой стали

### Порядок выполнения работы

1. Зачеканить или приварить с тыльной стороны пластин на равном расстоянии от намечаемой оси движения источника нагрева. Ось движения выбрать возле края пластины.

2. Начать автоматическую сварку. Режим занести в таблицу 5.1.

Таблица 5.1.

Режимы сварки

$I_{св}, A$	$U_{д}, B$	$v, см/сек$	$\eta$

В момент прохождения дуги поперечного сечения, в котором установлены термопары, включить секундомер и одновременно приступить к снятию показаний пирометрических милливольтметров. Полученные значения занести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2

Температура точек пластины

t, сек	0	3	5	10	15	25	40	60	100	180	300
$T_{1эксп}, ^\circ C$											
$T_{2эксп}, ^\circ C$											
$T_{1-2расч}, ^\circ C$											
$T_{3эксп}, ^\circ C$											
$T_{4эксп}, ^\circ C$											
$T_{3-4расч}, ^\circ C$											

По полученным данным построить кривые изменения температуры для симметричных относительно оси точек ( $T_1$  и  $T_2$ ,  $T_3$  и  $T_4$ ). Сравнить их и сделать выводы.

3. Вычислить температуру для симметричных относительно оси точек ( $T_{1-2расч}$ ,  $T_{3-4расч}$ ), используя схему расчета для быстродвижущегося линейного источника. Результаты вычисления внести в таблицу 5.2. Сравнить кривые изменения температуры

### Содержание отчета

Отчет должен включать описание экспериментов, результаты измерений и вычислений, выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Как влияют размеры изделий на процесс распространения тепла при сварке?

2. Как рассчитывают процесс распространения тепла для изделий ограниченных размеров?

3. Возможно ли использование для расчетов формулы, предназначенной для неограниченных тел?

**Список используемой литературы**

1. Багрянский К.В., Добротина З.А., Хренов К.К. Теория сварочных процессов - Киев: Вища школа, 1976.
2. Лабораторные работы по сварке. Под ред. Г.А. Николаева - М.: Высшая школа, 1971.
3. Петров Г.Л., Тумарев А.С. Теория сварочных процессов - М. Высшая школа, 1977.
4. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке - М.: Машгиз, 1951
5. Рыкалин Н.Н. расчеты тепловых процессов при сварке – Справочник по сварке. Т.1. М.: Машгиз, 1961
6. Сагалевиц В.М. Лабораторные работы по курсу «Тепловые основы сварки». М.: МВТУ, 1971
7. Теоретические основы сварки. Под ред. В.В.Фролова. М.: Высшая школа, 1970.