

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**
ЮРГИНСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

М.А. Кузнецов, Д.П. Ильященко

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВАРКЕ

*Рекомендовано в качестве учебно-методического пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2022

УДК 621.791.01:53(075.8)

ББК 30.61я73

К89

Кузнецов М.А.

К89 Физико-химические и тепловые процессы при сварке : учебно-методическое пособие / М.А. Кузнецов, Д.П. Ильященко ; Юргинский технологический институт. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2022. – 41 с.

ISBN 978-5-4387-1094-3

В пособии приведены практические задания по дисциплинам «Физико-химические и тепловые процессы при сварке» и «Теория сварочных процессов», позволяющие студентам получить навыки проведения расчетов по формулам, описывающим физико-химические и тепловые процессы, происходящие при различных способах сварки.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 15.03.01 «Машиностроение».

УДК 621.791.01:53(075.8)

ББК 30.61я73

Рецензенты

Доктор технических наук, доцент
профессор кафедры промышленных технологий
Новгородского государственного университета
имени Ярослава Мудрого
С.Б. Сапожков

Кандидат технических наук, доцент
заведующий кафедрой технологии машиностроения
Тюменского индустриального университета
Р.Ю. Некрасов

ISBN 978-5-4387-1094-3

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ Юргинский
технологический институт (филиал), 2022
© Кузнецов М.А., Ильященко Д.П., 2022
© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Практическая работа 1	
Требования к источникам энергии для сварки и оценка их эффективности	5
Практическая работа 2	
Термическое равновесие	9
Практическая работа 3	
Баланс энергии в приэлектродных областях	11
Практическая работа 4	
Источники теплоты	13
Практическая работа 5	
Нагрев и плавление металла при сварке	17
Практическая работа 6	
Плавление основного металла	21
Практическая работа 7	
Нагрев и плавление сварочного материала	24
Практическая работа 8	
Свариваемость сталей и сплавов	28
Заключение	31
Список сокращений	32
Список литературы	33
Приложения	34

ВВЕДЕНИЕ

Для описания действий, происходящих при плавлении и кристаллизации металла при сварке, применяются широкие знания из различных фундаментальных и инженерных дисциплин. Физико-химические и тепловые процессы при сварке являются одними из основных при формировании самого сварного соединения, а также его структуры, химического состава и механических свойств. Изучение физико-химических и тепловых процессов при сварке закладывает теоретическую базу для понимания технологии изготовления сварных металлоконструкций и сварочных материалов.

В пособии изложены физико-химические и тепловые процессы, происходящие при различных способах сварки. Приведены практические задачи по следующим разделам дисциплин «Физико-химические и тепловые процессы при сварке» и «Теория сварочных процессов»: требования к источникам энергии для сварки и оценка их эффективности; термическое равновесие; свариваемость металлов и сплавов; источники теплоты; нагрев и плавление металла при сварке; плавление основного металла; нагрев и плавление сварочных материалов; баланс энергии в приэлектродных областях. Данные дисциплины охватывают все процессы, происходящие при сварке материалов и определяющие качество, эксплуатационную надежность и работоспособность сварных металлоконструкций.

Решение задач позволит ознакомиться с особенностями процессов, происходящих при различных способах сварки. Пособие направлено на усвоение теоретического материала и получение практических навыков у студентов, что соответствует практико-ориентированной подготовке.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 1

Требования к источникам энергии для сварки и оценка их эффективности

Цель работы

Определение удельной энергии для различных способов сварки.

Задание 1

Определить удельную энергию $\varepsilon_{\text{ст}}$, Дж/мм², при дуговой сварке в один проход материала толщиной δ , мм, при силе тока I , А, напряжении U , В, и скорости сварки v , м/ч.

Методика выполнения работы

1. Согласно табл. 1 по варианту выбрать входные данные для расчета удельной энергии.

Таблица 1

Входные данные для расчета удельной энергии

Вариант	δ , мм	I , А	U , В	v , м/ч
1	3	90	18	3
2	4	100	19	5
3	5	150	21	6
4	6	180	20	7
5	7	200	22	10
6	8	250	23	12
7	9	300	24	14
8	10	240	25	15
9	11	220	24	17
10	12	250	25	12
11	13	180	22	25
12	14	200	21	20
13	15	350	27	19
14	16	400	28	30
15	17	450	30	25
16	18	500	29	30
17	19	550	33	31
18	20	600	34	35
19	21	650	35	30
20	22	700	34	25

2. Рассчитать удельную энергию, Дж/см², по формуле [1]:

$$\varepsilon_{\text{ст}} = \frac{I \cdot U}{v \cdot \delta}, \quad (1)$$

где I – сила сварочного тока, А; U – напряжение, В; v – скорость сварки, см/с; δ – толщина металла, см.

3. По параметрам режима определить способ сварки.

Задание 2

Определить удельную энергию $\varepsilon_{\text{ст}}$, Дж/мм², при сварке плавлением встык ванном способом двух металлических стержней диаметром d , мм.

Методика выполнения работы

1. Согласно табл. 2 по варианту выбрать входные данные для расчета удельной энергии.

Таблица 2

Входные данные для расчета удельной энергии

Вариант	Материал	d , мм
1	Низколегированная сталь	5
2	Коррозионно-стойкая сталь	10
3	Алюминий	15
4	Сплав алюминия (АМГ ₆)	20
5	Сплав алюминия (АМц)	25
6	Сплав алюминия (Д16)	30
7	Титан	35
8	Сплав титана (ВТ6)	40
9	Медь	45
10	Латунь (Л63)	50
11	Магний	5
12	Никель	10
13	Низколегированная сталь	15
14	Коррозионно-стойкая сталь	20
15	Алюминий	25
16	Сплав алюминия (АМГ ₆)	30
17	Сплав алюминия (АМц)	35
18	Сплав алюминия (Д16)	40
19	Титан	45
20	Сплав титана (ВТ6)	50

2. Рассчитать удельную энергию, Дж/мм². Удельная энергия, требуемая для сварки ванным способом, определяется как произведение удельного объемного теплосодержания расплавленного металла при температуре и ширины расплавленной зоны по формуле [1]:

$$\varepsilon_{\text{ст}} = \Delta H \cdot B, \quad (2)$$

где ΔH – удельное объемное теплосодержание расплавленного металла при температуре его плавления, Дж/см²; B – ширина расплавленной зоны, см.

3. Рассчитать удельное объемное теплосодержание расплавленного металла при температуре его плавления, Дж/см². Согласно обобщенной схеме баланса энергии, существует внешний источник энергии, которая вносится в зону сварки с расплавляемым электродным металлом. Удельное объемное теплосодержание расплавленного металла при температуре его плавления рассчитывается по формуле [1]:

$$\Delta H = \rho \cdot (c_{\text{пл}} \cdot T_{\text{пл}} + q_{\text{пл}}), \quad (3)$$

где ρ – плотность, г/см³; $c_{\text{пл}}$ – удельная теплоемкость, Дж/(г·К); $T_{\text{пл}}$ – температура плавления, °С; $q_{\text{пл}}$ – скрытая теплота плавления, Дж/г.

Основные физические свойства металлов и сплавов приведены в прил. 1. Удельную теплоемкость из прил. 1 выбираем при нормальных условиях.

Задание 3

Определить удельную энергию $\varepsilon_{\text{ст}}$, Дж/мм², при сварке трением двух металлических стержней диаметром d , мм.

Методика выполнения работы

1. Согласно табл. 2 по варианту выбрать входные данные для расчета удельной энергии.
2. Рассчитать удельную энергию, Дж/мм², по формуле (2) [1].
3. Рассчитать удельное объемное теплосодержание расплавленного металла при температуре его плавления по формуле (3), Дж/см² [1]. При расчете необходимо учесть, что процесс формирования сварного шва при сварке трением происходит без затрат на скрытую теплоту плавления.

Контрольные вопросы и задания

1. Перечислите стадии, которые происходят в процессе сварки.
2. От каких параметров зависит удельная энергия?
3. Перечислите технологические отличия различных способов сварки (сварка плавлением и сварка давлением).

4. Перечислите источники энергии при различных способах сварки.
5. Перечислите технологические отличия сварки от пайки.
6. Перечислите межатомные связи и их особенности.
7. Перечислите технологические отличия сварки от склеивания.
8. Перечислите технологические отличия пайки от склеивания.
9. Какие элементарные связи существуют в твердых телах?
10. Объясните механизм образования монокристаллических соединений твердых тел.
 11. Перечислите основные особенности сварки плавлением.
 12. Перечислите основные особенности сварки давлением.
 13. Перечислите способы сварки, которые относятся к сварке плавящимся электродом.
 14. Перечислите способы сварки, которые относятся к сварке неплавящимся электродом.
 15. Перечислите способы сварки, которые относятся к сварке давлением.
 16. Назовите термодинамическое определение сварки.
 17. Что такое тепловой баланс энергии при сварке?
 18. Какой КПД имеют сварочные процессы?
 19. По каким признакам классифицируются сварочные процессы?
 20. Перечислите термические процессы, происходящие при сварке.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 2

Термическое равновесие

Цель работы

Определение существования термического равновесия в столбе дуги.

Задание

Определить, существует ли термическое равновесие в столбе дуги при сварке вольфрамовым электродом в среде аргона (ИНп).

Методика выполнения работы

1. Согласно табл. 3 по варианту выбрать входные данные для расчета термического равновесия в столбе дуги.

Таблица 3

Входные данные для расчета термического равновесия в столбе дуги

Вариант	E , В/м	p , Па	T , К
1	900	10	5000
2	950	100	5500
3	1000	1000	6000
4	1050	10 000	6500
5	1100	100 000	7000
6	1200	10	7500
7	1250	100	8000
8	1300	1000	8500
9	1350	10 000	9000
10	1400	100 000	9500
11	900	10	10 000
12	950	100	10 500
13	1000	1000	11 000
14	1050	10 000	11 500
15	1100	100 000	12 000
16	1200	10	12 500
17	1250	100	13 000
18	1300	1000	13 500
19	1350	10 000	14 000
20	1400	100 000	14 500

2. Рассчитать относительную разность энергий по формуле [1]:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{2 \cdot e \cdot E}{3 \cdot Q_{ea} \cdot \rho}, \quad (4)$$

где e – заряд электрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ К); E – напряженность электрического поля, В/м; Q_{ea} – эффективное сечение, м^2 . Для атомов инертных газов это явление называется эффектом Рамзауэра [1], значение которого выбрать по прил. 3 [1] в зависимости от защитного газа и значения $k \cdot T$, эВ; ρ – давление, Па.

3. Рассчитать относительную разность температур по формуле [1]:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{m_a}{4 \cdot m_e} \cdot \left(\frac{\Lambda_{ea} \cdot E}{\left(\frac{3}{2}\right) \cdot k \cdot T} \right)^2, \quad (5)$$

где m_a/m_e – число соударений. В среде аргона $m_a/m_e = 10^5$; Λ_e – длина свободного пробега, м; E – напряженность электрического поля, В/м; k – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T – температура, К.

4. Рассчитать длину свободного пробега, м, по формуле [1]:

$$\Lambda_{ea} = \frac{k \cdot T}{\rho \cdot Q_{ea}}, \quad (6)$$

где k – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T – температура, К; ρ – давление, Па; Q_{ea} – эффективное сечение, м^2 .

5. Сделать вывод, существует ли термическое равновесие в столбе дуги при сварке вольфрамовым электродом в среде аргона. Термическое равновесие в столбе дуги существует, если $\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} \ll 1$ и $\frac{\Delta T}{T} \ll 1$ [1].

Контрольные вопросы и задания

1. В чем заключается эффект Рамзауэра?
2. При каком условии термическое равновесие в столбе дуги существует?
3. Назовите основные способы возбуждения дуги.
4. От каких параметров зависит эффективный потенциал ионизации?
5. Что такое эффективное сечение?
6. Назовите уравнение Саха.
7. Что такое эффективный потенциал ионизации?
8. Что такое баланс энергии в столбе дуги?
9. Какое влияние оказывает газовая среда на процессы, происходящие при сварке?
10. Дайте определение понятию «термодинамическое равновесие».

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 3

Баланс энергии в приэлектродных областях

Цель работы

Определение тепловыделения в приэлектродных областях.

Задание

Для металлической дуги из эксперимента получено: U_k , В, и U_a , В, при температуре T , К. Для значений kT , эВ, и φ , эВ. Определить тепловыделение в приэлектродных областях.

Методика выполнения работы

1. Согласно табл. 4 по варианту выбрать входные данные для расчета тепловыделения в приэлектродных областях.

Таблица 4

Входные данные для расчета тепловыделения в приэлектродных областях

Вариант	U_k , В	U_a , В	T , К	φ , эВ	$E_{ст}$, В/см	$l_{ст}$, мм
1	5	1	5000	1	2	6
2	6	1	5100	2	3	7
3	7	2	5200	3	4	8
4	8	3	5300	4	5	9
5	9	4	5400	5	6	10
6	10	5	5600	1	7	11
7	11	6	5700	2	8	12
8	12	7	5800	3	9	13
9	13	8	5900	4	10	14
10	14	9	6000	5	11	15
11	15	10	6100	1	12	6
12	16	11	6200	2	13	7
13	17	12	6300	3	14	8
14	18	13	6400	4	15	9
15	19	14	6500	5	16	10
16	20	15	6600	1	17	11
17	21	16	6700	2	18	12
18	22	17	6800	3	19	13
19	23	18	6900	4	20	14
20	24	19	7000	5	21	15

2. Рассчитать тепловыделение, W , в катодной области по формуле [1]:

$$W_k = U_k - (\varphi + 2 \cdot k \cdot T), \quad (7)$$

где U_k – падение потенциала в катодной области, В; k – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T – температура, К; φ – работа выхода, эВ.

3. Рассчитать тепловыделение, W , в анодной области по формуле [1]:

$$W_a = U_a + (\varphi + 2 \cdot k \cdot T), \quad (8)$$

где U_a – падение потенциала в анодной области, В; k – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T – температура, К; φ – работа выхода, В.

4. Рассчитать тепловыделение в столбе дуги, W , по формуле [1]. Тепловыделение в столбе дуги зависит от длины дуги и напряженности электрического поля. В свою очередь, напряженность электрического поля зависит от теплофизических свойств среды и тока:

$$W_{ст} = E_{ст} \cdot l_{ст}, \quad (9)$$

где $E_{ст}$ – напряженность электрического поля, В/см; $l_{ст}$ – длина дуги, мм.

5. Рассчитать общее тепловыделение в дуге.

Контрольные вопросы и задания

1. Перечислите зоны дуги и их особенности.
2. Опишите основные процессы в катодной области дуги.
3. На каком электроде сварочной дуги выделяется больше энергии?
4. Назовите основные виды переноса металла в сварочной дуге.
5. Как влияет сжатие сварочной дуги на ее свойства?
6. Какие эмиссионные процессы происходят на поверхности твердых тел?
7. Какова классификация дуг по катодным процессам?
8. Какова структура катодной области?
9. Какова температура в катодной, анодной областях и в столбе дуги?
10. Опишите основные процессы в анодной области дуги.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 4

Источники теплоты

Цель работы

Определение температуры листа под центром различных источников энергии.

Задание

Лист из металла толщиной δ , мм, нагревают пламенем газовой горелки, перемещающейся со скоростью v , см/с. Эффективная мощность пламени в процессе нагрева составляет q , Вт, а диаметр пятна нагрева – d , см², соответственно. Необходимо оценить температуру листа ΔT , К, под центром пламени, объемную теплоемкость c_p , Дж/(см³·К), коэффициент теплопроводности λ , Вт/(см·К), выбираем из прил. 2.

Методика выполнения работы

1. Согласно табл. 5 по варианту выбрать входные данные для расчета температуры листа под центром различных источников энергии.

Таблица 5

Входные данные для расчета температуры листа под центром различных источников энергии

Вариант	Материал	δ , мм	v , см/с	q , Вт	d , см ²
1	Сталь	1	0,1	1000	1
2	Аустенитная сталь	2	0,15	1100	1
3	Медь	3	0,2	1200	1
4	Латунь	4	0,25	1300	1,5
5	Алюминий	5	0,3	1400	2
6	Титан	6	0,35	1500	2,5
7	Сталь	7	0,4	1600	3
8	Аустенитная сталь	8	0,45	1700	3,5
9	Медь	9	0,50	1800	4
10	Латунь	10	0,55	1900	4,5
11	Алюминий	1	0,55	2000	5
12	Титан	2	0,5	2100	5,5
13	Сталь	3	0,45	2200	6
14	Аустенитная сталь	4	0,4	2300	6,5
15	Медь	5	0,35	2400	7
16	Латунь	6	0,3	2500	7,5

Вариант	Материал	δ , мм	ν , см/с	q , Вт	d , см ²
17	Алюминий	7	0,25	2600	8
18	Титан	8	0,2	2700	8,5
19	Сталь	9	0,15	2800	9
20	Аустенитная сталь	10	0,1	2900	9,5

2. Рассчитать коэффициент сосредоточенности, см⁻². Считая пламя газовой горелки нормально-круговым источником теплоты, определяем коэффициент его сосредоточенности по формуле [1]:

$$k = \left(\frac{3,46}{d} \right)^2, \quad (10)$$

где d – диаметр пятна нагрева, см².

3. Рассчитать коэффициент температуропроводности, см²/с, по формуле [1]:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad (11)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(см·К); $c\rho$ – объемная теплоемкость, Дж/(см³·К).

4. Рассчитать коэффициент теплоотдачи, с⁻¹, листа по формуле [1]:

$$b = \frac{\alpha}{c\rho \cdot \delta}, \quad (12)$$

где α – коэффициент температуропроводности, см²/с; $c\rho$ – объемная теплоемкость, Дж/(см³·К); δ – толщина металла, мм.

5. Рассчитать постоянную времени распределения источника, с, по формуле [1]:

$$t_0 = \frac{1}{4 \cdot \alpha \cdot k}, \quad (13)$$

где α – коэффициент температуропроводности, см²/с; k – коэффициент сосредоточенности, см⁻².

6. Рассчитать расстояние от начала подвижной системы координат до центра пламени, см, по формуле [1]:

$$r = \nu \cdot t_0, \quad (14)$$

где ν – скорость перемещения газовой горелки, см/с; t_0 – постоянная времени распределения источника, с.

7. Рассчитать безразмерный критерий расстояния по формуле [1]:

$$\rho_2 = r \cdot \sqrt{\frac{v^2}{4 \cdot a^2} + \frac{b}{a}}, \quad (15)$$

где r – расстояние от начала подвижной системы координат до центра пламени, см; v – скорость перемещения газовой горелки, см/с; a – коэффициент температуропроводности, см²/с; b – коэффициент температуротдачи, с⁻¹.

8. Рассчитать безразмерный критерий времени по формуле [1]:

$$\tau_0 = t_0 \cdot \left(\frac{v^2}{4 \cdot a} + b \right), \quad (16)$$

где t_0 – постоянная времени распределения источника, с; v – скорость перемещения газовой горелки, см/с; a – коэффициент температуропроводности, см²/с; b – коэффициент температуротдачи, с⁻¹.

9. Рассчитать приращение температуры, К, по формуле [1]:

$$\Delta T = \Delta T_{\text{пр}} \cdot \exp(b \cdot t_0) \cdot (1 - \psi_{2(\rho_2, \tau_0)}), \quad (17)$$

где $\Delta T_{\text{пр}}$ – рассчитать по формуле (18) [1]; b – коэффициент температуротдачи, с⁻¹; t_0 – постоянная времени распределения источника; ψ – коэффициент теплонасыщения. Значение коэффициента теплонасыщения выбрать по прил. 4 в зависимости от значений ρ_2 и τ_0 [1].

$$\Delta T_{\text{пр}} = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \delta} \exp\left(-\frac{v \cdot x}{2 \cdot a}\right) \cdot K_{0(\rho_2)}, \quad (18)$$

где q – эффективная мощность пламени, Вт; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(см·К); δ – толщина металла, см; v – скорость перемещения газовой горелки, см/с; $x = r - r$ – расстояние от начала подвижной системы координат до центра пламени, см; a – коэффициент температуропроводности, см²/с; K_0 – модифицированная функция Бесселя второго рода нулевого порядка. K_0 выбирается в зависимости от значения ρ_2 по прил. 5.

Контрольные вопросы и задания

1. Как может быть представлено движение источника теплоты?
2. Как распространяется теплота в пластине при нагреве?
3. Перечислите источники теплоты.
4. Перечислите параметры, от которых зависит температура листа под центром пламени.
5. Что означает понятие «нормально-круговой источник теплоты»?

6. Что является источником энергии при газовой сварке?
7. От каких параметров зависит коэффициент температуропроводности стали?
8. В каких единицах измеряется коэффициент температуропроводности стали?
9. Как определяли коэффициент теплонасыщения?
10. Что является источником энергии при электрошлаковой сварке?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 5

Нагрев и плавление металла при сварке

Цель работы

Определение максимальной температуры нагрева, мгновенной скорости охлаждения и ширины зоны нагрева.

Задание 1

Определить максимальную температуру нагрева T_m , К, на расстоянии y , см, от оси шва при механизированной сварке с полным проплавлением листов металла толщиной δ , мм. Режимы сварки: сила сварочного тока I , А, напряжение дуги U , В, скорость сварки v , см/с, эффективный КПД дуги η представлены в табл. 6. Теплофизические коэффициенты – коэффициент теплопроводности λ , Вт/(см·К), и объемная теплоемкость c_p , Дж/(см³·К), – приведены в прил. 2. Начальную температуру листов T_n , К, принимаем равной комнатной температуре.

Методика выполнения работы

1. Согласно табл. 6 по варианту выбрать входные данные для расчета максимальной температуры нагрева, мгновенной скорости охлаждения и ширины зоны нагрева.

Таблица 6

Входные данные для расчета максимальной температуры нагрева, мгновенной скорости охлаждения и ширины зоны нагрева

Вариант	Материал	y , см	δ , мм	I , А	U , В	v , см/с	η	T , К
1	Сталь	1	10	400	25	0,5	0,7	825
2	Аустенитная сталь	2	9	350	24	0,4	0,67	800
3	Медь	3	8	300	23	0,4	0,65	750
4	Латунь	4	7	280	22	0,3	0,63	720
5	Алюминий	5	6	260	21	0,3	0,6	700
6	Титан	6	5	240	20	0,2	0,59	670
7	Сталь	7	4	220	19	0,2	0,57	600
8	Аустенитная сталь	8	3	200	18	0,2	0,55	550
9	Медь	9	2	170	17	0,1	0,53	530
10	Латунь	10	1	150	16	0,1	0,5	500

Окончание табл. 6

Вариант	Материал	y , см	δ , мм	I , А	U , В	v , см/с	η	T , К
11	Алюминий	10	1	130	15	0,1	0,4	400
12	Титан	9	2	150	16	0,1	0,43	450
13	Сталь	8	3	190	17	0,1	0,45	500
14	Аустенитная сталь	7	4	210	18	0,2	0,47	550
15	Медь	6	5	230	19	0,2	0,5	600
16	Латунь	5	6	250	20	0,3	0,53	650
17	Алюминий	4	7	270	21	0,3	0,55	700
18	Титан	3	8	290	22	0,4	0,57	750
19	Сталь	2	9	320	23	0,4	0,57	780
20	Аустенитная сталь	1	10	350	24	0,5	0,6	800

2. Рассчитать эффективную мощность источника, Вт, по формуле [1]:

$$q = \eta \cdot U \cdot I, \quad (19)$$

где η – эффективный КПД дуги; U – напряжение дуги, В; I – сила сварочного тока, А.

3. Рассчитать максимальную температуру, К, по формуле [1]:

$$T_m(y) = T_n + \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi \cdot e}} \cdot \frac{q}{v}}{2 \cdot \delta \cdot c_p \cdot y}, \quad (20)$$

где T_n – начальная температура, К; e – основание натурального логарифма (2,72); q – эффективная мощность источника, Вт; v – скорость сварки, см/с; δ – толщина металла, см; c_p – объемная теплоемкость, Дж/(см³·К); y – расстояний от оси шва, см.

Задание 2

На поверхность массивного изделия из материала наплавляют валик. Параметры режима наплавки: сила сварочного тока I , А, напряжение дуги U , В, скорость наплавки v , см/с, эффективный КПД дуги η представлены в табл. 6. Требуется определить мгновенную скорость охлаждения $\omega(T)$, К/с, наплавленного металла при температуре T , К, и в случае если она превышает 25 К/с, определить температуру подогрева изделия, обеспечивающую указанную скорость охлаждения. Теплофи-

зические коэффициенты – коэффициент теплопроводности λ , Вт/(см·К), и объемная теплоемкость c_p , Дж/(см³·К), – приведены в прил. 2. Начальную температуру изделия T_n , К, принимаем равной комнатной температуре.

Рассчитать:

1. Эффективную мощность источника, Вт, по формуле (19) [1].
2. Скорость охлаждения на оси шва, К/с, при температуре T , К, по формуле [1]:

$$\omega(T) = -2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \frac{(T - T_n)^2}{\frac{q}{v}}, \quad (21)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(см·К); T – температура, К; T_n – начальная температура изделия, К; q – эффективная мощность источника, Вт; v – скорость наплавки, см/с.

3. В случае если без подогрева скорость охлаждения превышает требуемое значение 25 К/с – начальную температуру изделия T_n , К, обеспечивающую скорость охлаждения 25 К/с по формуле [1].

$$(T - T_n)^2 = -\omega(T) \cdot \frac{v}{2 \cdot \pi \cdot \lambda}; \quad (22)$$

$$T_n = T - (T - T_n), \quad (23)$$

где $\omega(T)$ – скорость охлаждения на оси шва, К/с; q – эффективная мощность источника, Вт; v – скорость наплавки, см/с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(см·К).

Задание 3

На поверхность массивного тела наплавляют валик. Параметры наплавки: сила сварочного тока I , А, напряжение дуги U , В, скорость наплавки v , см/с, эффективный КПД дуги η представлены в табл. 6. Требуется определить ширину зоны, нагреваемой выше температуры T , К. Теплофизические коэффициенты – коэффициент теплопроводности λ , Вт/(см·К), и объемная теплоемкость c_p , Дж/(см³·К), – приведены в прил. 2. Начальную температуру изделия T_n , К, принимаем равной комнатной температуре.

Рассчитать:

1. Эффективную мощность источника, Вт, по формуле (19) [1].

2. Ширину зоны нагрева, см. Полагаем источник теплоты быстро-движущимся и используем выражение для схемы массивного тела и рассчитываем по формуле [1].

$$2l = \sqrt{\frac{8 \cdot q}{\pi \cdot e \cdot c_p \cdot (T - T_n)}}, \quad (24)$$

где q – эффективная мощность источника, Вт; v – скорость наплавки, см/с; e – основание натурального логарифма (2,72); c_p – объемная теплоемкость, Дж/(см³·К); T – температура, К; T_n – начальная температура изделия, К.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение термическому циклу.
2. Как получают выражение для расчета максимальных температур?
3. От каких параметров зависит эффективная мощность источника теплоты?
4. Объясните понятие «эффективный КПД дуги».
5. Как получают выражение для расчета мгновенной скорости охлаждения?
6. Как характеризуется термический цикл при однопроходной сварке?
7. Как рассчитывается максимальная температура?
8. Как рассчитывается мгновенная скорость охлаждения?
9. От каких параметров зависит мгновенная скорость охлаждения?
10. Как рассчитывается ширина зоны нагрева?
11. От каких параметров зависит ширина зоны нагрева при многопроходной сварке?
12. Как параметры сварки влияют на ширину зоны нагрева?
13. Как параметры сварки влияют на проплавление основного металла?
14. Какие параметры сварки влияют на ширину сварного шва?
15. Что относится к геометрическим параметрам стыкового сварного соединения?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 6

Плавление основного металла

Цель работы

Определение размеров зоны проплавления.

Задание 1

На поверхность массивного тела наплавляют валик. Скорость наплавки v , см/с, представлена в табл. 6. Требуется определить размеры зоны проплавления: длину сварочной ванны L , см, и ширину сварочной ванны B , см. Теплофизические коэффициенты – коэффициент теплопроводности λ , Вт/(см·К), и объемная теплоемкость c_p , Дж/(см³·К), – приведены в прил. 2. Начальную температуру изделия T_n , К, принимаем равной комнатной температуре.

Методика выполнения работы

1. Рассчитать эффективную мощность источника, Вт, по формуле (19) [1].
2. Рассчитать длину сварочной ванны, см, по формуле [1]:

$$L = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot (T_{пл} - T_n)}, \quad (25)$$

где q – эффективная мощность источника (Вт); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(см·К); $T_{пл}$ – температура плавления материала, К; T_n – начальная температура изделия, К.

3. Рассчитать ширину сварочной ванны, см. Принимаем источник теплоты как быстродвижущийся, поэтому ширину сварочной ванны определяем по формуле [1]:

$$B = \sqrt{\frac{8 \cdot q}{\pi \cdot e \cdot c_p (T_{пл} - T_n)}}, \quad (26)$$

где q – эффективная мощность источника, Вт; v – скорость наплавки, см/с; e – основание натурального логарифма (2,72); c_p – объемная теплоемкость, Дж/(см³·К); $T_{пл}$ – температура плавления материала, К; T_n – начальная температура изделия, К.

4. Рассчитать площадь проплавления основного металла, см². При наплавке валика на массивное тело площадь проплавления основного ме-

талла можно определить как площадь, ограниченную в поперечном сечении линий максимальных температур, равных температуре плавления. Учитывая, что максимальная температура равна температуре плавления, площадь проплавления основного металла рассчитываем по формуле [1]:

$$F_{\text{пл}} = \frac{q}{e \cdot c_p \cdot (T_{\text{пл}} - T_{\text{н}})}, \quad (27)$$

где q – эффективная мощность источника, Вт; v – скорость наплавки, см/с; e – основание натурального логарифма (2,72); c_p – объемная теплоемкость, Дж/(см³·К); $T_{\text{пл}}$ – температура плавления материала, К; $T_{\text{н}}$ – начальная температура изделия, К.

Задание 2

Определить длину сварочной ванны L , см, ширину сварочной ванны B , см, и площадь проплавления основного металла $F_{\text{пл}}$, см², для однопроходной сварки листов с полным проплавлением. Толщина материала δ , мм, и скорость сварки v , см/с, представлены в табл. 6. Теплофизические коэффициенты – коэффициент теплопроводности λ , Вт/(см·К), и объемная теплоемкость c_p , Дж/(см³·К), приведены в прил. 2. Начальную температуру изделия $T_{\text{н}}$, К, принимаем равной комнатной температуре.

Рассчитать:

1. Эффективную мощность источника, Вт, по формуле (19) [1].
2. Длину сварочной ванны, см, по формуле [1]:

$$L = \frac{q^2}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c_p \cdot v \cdot \delta^2 \cdot (T_{\text{пл}} - T_{\text{н}})^2}, \quad (28)$$

где q – эффективная мощность источника, Вт; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(см·К); c_p – объемная теплоемкость, Дж/(см³·К); v – скорость сварки, см/с; δ – толщина металла, см; $T_{\text{пл}}$ – температура плавления материала, К; $T_{\text{н}}$ – начальная температура изделия, К.

3. Ширину сварочной ванны, см, по формуле [1]:

$$B = \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi \cdot e} \cdot \frac{q}{v \cdot \delta}}}{c_p \cdot (T_{\text{пл}} - T_{\text{н}})}, \quad (29)$$

где e – основание натурального логарифма (2,72); q – эффективная мощность источника, Вт; v – скорость сварки, см/с; δ – толщина металла, см; c_p – объемная теплоемкость, Дж/(см³·К); $T_{\text{пл}}$ – температура плавления материала, К; $T_{\text{н}}$ – начальная температура изделия, К.

4. Площадь проплавления основного металла, см^2 , по формуле [1]:

$$F_{\text{пл}} = B \cdot \delta, \quad (30)$$

где B – ширина сварочной ванны, см; δ – толщина металла, см.

Контрольные вопросы и задания

1. В чем отличие в расчете ширины сварочной ванны при наплавке и сварке?
2. В чем отличие в расчете длины сварочной ванны при наплавке и сварке?
3. В чем отличие в расчете площади проплавления основного металла при наплавке и сварке?
4. Какими параметрами характеризуется форма сечения сварного шва?
5. Перечислите параметры термического цикла, применяющие при сварке.
6. Перечислите формы сварочных ванн при различных способах сварки.
7. Как рассчитываются размеры зоны проплавления?
8. Какова эффективность процесса проплавления?
9. Что относится к основному металлу при сварке?
10. Какова температура расплавленного металла в различных точках сварочной ванны?
11. От чего зависит глубина проплавления основного металла?
12. Влияет ли толщина основного металла на параметры процесса сварки?
13. От каких параметров зависит количество проходов при сварке плавящимся электродом в среде защитных газов?
14. От каких параметров зависит размер сварочной ванны?
15. Зависят ли параметры процесса сварки от химического состава основного металла?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 7

Нагрев и плавление сварочного материала

Цель работы

Определение производительности расплавления электродного металла.

Задание 1

Определить температуру ΔT , К, **огарка** электрода диаметром d , мм, из металла при сварочном токе I , А. Длина рабочей части электрода Δl , мм, коэффициент расплавления α_p , г/(А·ч). Удельное сопротивление материала r , Ом·см, выбираем из прил. 1. Объемную теплоемкость материала c_p , Дж/(см³·К), – из прил. 2.

Методика выполнения работы

1. Согласно табл. 7 по варианту выбрать входные данные для расчета производительности расплавления электродного металла.

Таблица 7

Входные данные для расчета производительности расплавления электродного металла

Вариант	Материал	d , мм	I , А	Δl , мм	α_p , г/(А·ч)
1	Титан	2	90	300	4
2	Титан	3	100	320	8
3	Алюминий	4	120	400	10
4	Алюминий	5	150	420	14
5	Латунь	6	300	450	18
6	Латунь	2	100	310	5
7	Медь	3	120	330	9
8	Медь	4	160	410	11
9	Аустенитная сталь	5	150	430	15
10	Аустенитная сталь	6	180	450	19
11	Сталь	2	80	300	6
12	Сталь	3	120	310	10
13	Титан	4	130	330	12
14	Титан	5	140	380	16
15	Алюминий	6	180	440	20
16	Алюминий	2	60	310	7

Вариант	Материал	d , мм	I , А	Δl , мм	α_p , г/(А·ч)
17	Латунь	3	180	320	11
18	Латунь	4	240	300	13
19	Медь	5	240	390	17
20	Медь	6	300	450	21

2. Рассчитать массу рабочей части электрода (г) по формуле [1]:

$$\Delta m = \rho \cdot F \cdot \Delta l, \quad (31)$$

где ρ – плотность материала, г/см³; F – площадь поперечного сечения электрода, см²; Δl – длина рабочей части электрода, см.

3. Рассчитать время протекания тока, с, по формуле [1]:

$$\Delta t = \frac{\Delta m}{\alpha_p \cdot I}, \quad (32)$$

где Δm – масса рабочей части электрода, г; α_p – коэффициент расплавления, г/(А·ч); I – сила сварочного тока, А.

4. Рассчитать приращение температуры огарка, К. Без учета теплоотдачи с поверхности и нагрева дугой приращение температуры огарка рассчитываем по формуле [1]:

$$\Delta T = \frac{r}{c_p} \cdot \left(\frac{I}{F} \right)^2, \quad (33)$$

где r – удельное сопротивление материала, Ом·см; c_p – объемная теплоемкость материала, Дж/(см³·К); I – сила сварочного тока, А; F – площадь поперечного сечения электрода, см².

5. Рассчитать температуру огарка, К, с учетом начальной температуры стержня электрода по формуле [1]:

$$T = \Delta T + T_n, \quad (34)$$

где ΔT – температура огарка, К; T_n – начальная температура стержня электрода, К. Начальную температуру принимаем равной комнатной температуре.

Задание 2

Определить изменение температуры ΔT , К, сварочной проволоки диаметром d , мм, на расстоянии l , мм, от токоподвода при механизированной сварки сварочным током I , А. Коэффициент расплавления принять равным α_p , г/(А·ч). Удельное сопротивление материала r , Ом·см, выбираем из прил. 1. Объемную теплоемкость материала c_p , Дж/(см³·К), – из прил. 2.

Методика выполнения работы

1. Согласно табл. 8 по варианту выбрать входные данные для расчета изменения температуры.

Таблица 8

Входные данные для расчета изменения температуры

Вариант	Материал	d , мм	I , А	Δl , мм	α_p , г/(А·ч)
1	Медь	0,8	120	300	4
2	Медь	1	150	320	8
3	Латунь	1,2	200	400	10
4	Латунь	0,8	130	420	14
5	Алюминий	1	160	450	18
6	Алюминий	1,2	210	310	5
7	Титан	0,8	140	330	9
8	Титан	1	170	410	11
9	Сталь	1,2	220	430	15
10	Сталь	0,8	100	450	19
11	Аустенитная сталь	1	120	300	6
12	Аустенитная сталь	1,2	230	310	10
13	Медь	0,8	110	330	12
14	Медь	1	140	380	16
15	Латунь	1,2	240	440	20
16	Латунь	0,8	120	310	7
17	Алюминий	1	150	320	11
18	Алюминий	1,2	200	300	13
19	Титан	0,8	130	390	17
20	Титан	1	150	450	21

2. Рассчитать массу участка проволоки, г, длиной l по формуле (31) [1].

3. Рассчитать время расплавления участка проволоки, с, длиной l по формуле (32) [1].

4. Рассчитать приращение температуры огарка, К. Без учета теплоотдачи с поверхности и нагрева дугой приращение температуры огарка рассчитываем по формуле (33) [1].

Контрольные вопросы и задания

1. Какими параметрами характеризуется производительность расплавления электрода?
2. От каких параметров зависит сила сварочного тока при ручной дуговой сварке?
3. За счет каких параметров различается производительность различных способов сварки (механизированная сварка и автоматическая сварка)?
4. Перечислите параметры, которые относятся к режимам сварки.
5. В чем отличие параметров режима различных способов сварки (ручная дуговая сварка, механизированная и автоматическая)?
6. Перечислите схемы нагрева присадочного материала.
7. От каких параметров зависит производительность расплавления электрода?
8. Что относится к сварочным материалам?
9. Что такое разбрызгивание сварочного материала?
10. Перечислите основные недостатки сварки плавящимся электродом в среде углекислого газа.
11. Как выбираются сварочная проволока для дуговой сварки под слоем флюса?
12. Что является сварочным материалом при ручной дуговой сварке?
13. Из какого металла состоит сварное соединение при сварке в среде защитных газов неплавящимся электродом?
14. Как выбирается сварочный ток для ручной дуговой сварки?
15. Что является сварочным материалом для дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитных газов?

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА 8

СВАРИВАЕМОСТЬ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Цель работы

Определение свариваемости сталей и сплавов.

Методика выполнения работы

1. Согласно табл. 9 по варианту выбрать входные данные для расчета свариваемости сталей и сплавов.

Таблица 9

Входные данные для расчета свариваемости сталей и сплавов

Вариант	Марка стали
1	Ст3
2	Сталь 10
3	Сталь 09Г2С
4	Сталь 12Х18Н10Т
5	Сталь 10ХСНД
6	Сталь 35ХГСЛ
7	Сталь 30ХГСА
8	Сталь 20
9	Сталь 35
10	Сталь 40Х10С2М
11	Сталь 20Х23Н13
12	Сталь 08Х18Т
13	Сталь 45ХНМ
14	Сталь 40Х13
15	Сталь 18ХГТ
16	Сталь 12Х2Н4А
17	Ст5
18	Сталь 20Х13
19	Сталь 12Г2А
20	Сталь 40Х

2. Расшифровать марку стали.
3. Определить химический состав и механические свойства стали по марочнику стали.
4. Рассчитать эквивалентное содержание углерода по формуле (35) [4, 5].

$$C_{\text{экв}} = C + 2S + \frac{P}{3} + \frac{(Si - 0,4)}{4} + \frac{Ni}{8} + \frac{(Mn - 0,8)}{8} + \frac{Cu}{10} + \frac{(Cr - 0,8)}{10}, \quad (35)$$

где C, S, P, Si, Ni, Mn, Cu, Cr – обозначение химических элементов, %.

5. По табл. 10 определить, к какой группе свариваемости относится сталь.

Таблица 10

Группы свариваемости

Группа свариваемости	Эквивалентное содержание углерода, $C_{\text{экв}}$ (%)
Хорошая	<0,25
Удовлетворительная	0,25...0,35
Ограниченная	0,35...0,45
Плохая	>0,45

6. Рассчитать фактор склонности к образованию трещин по формуле (36) [6]:

$$HSC = \frac{C \cdot (S + P + 0,04 \cdot Si + 0,01 \cdot Ni) \cdot 10^3}{3 \cdot Mn + Cr + Mo + V}, \quad (36)$$

где C, S, P, Si, Ni, Mn, Cr, Mo, V – обозначение химических элементов, %.

7. Рассчитать единицы склонности к образованию трещин по формуле (37) [6]:

$$USC = 230 \cdot C + 190 \cdot S + 75 \cdot P + 45 \cdot Nb - 12,3 \cdot Si - 5,4 \cdot Mn - 1, \quad (37)$$

где C, S, P, Nb, Si, Mn – обозначение химических элементов, %.

8. По табл. 11 определить склонность стали к образованию трещин.

Таблица 11

Склонность стали к образованию трещин

Характеристики стали	Фактор склонности	Единица склонности
Стали с $\sigma_B < 700$ МПа	<4 не склонна	
Стали с $\sigma_B > 700$ МПа	<2 не склонна	
		<10 стойкая

9. Рассчитать критическую скорость деформирования по формуле (38) [6].

$$V_{\text{кр}} = 19 - 42 \cdot C - 411 \cdot S - 3,3 \cdot Si + 5,6 \cdot Mn + 6,7 \cdot Mo, \quad (38)$$

где C, S, Si, Mn, Mo – обозначение химических элементов, %.

10. По табл. 12 определить стойкость стали к деформациям.

Таблица 12

Стойкость стали к деформациям

>6 стойкая
<1,8 склонная

11. Рассчитать хромоникелевый эквивалент по формуле 39 [6]:

$$\frac{Cr_3}{Ni_3} = \frac{Cr + 1,37 \cdot Mo + 1,5 \cdot Si + 2 \cdot Nb + 3 \cdot Ti}{Ni + 0,3 \cdot Mn + 22 \cdot C + 14,2 \cdot N + Cu}, \quad (39)$$

где Cr, Mo, Si, Nb, Ti, Ni, Mn, C, N, Cu – обозначение химических элементов, %.

12. По табл. 13 определить склонность стали к образованию трещин.

Таблица 13

Склонность стали к образованию трещин

>1,5 не склонная
<1,5 склонная

Контрольные вопросы и задания

1. Перечислите группы свариваемости.
2. От каких параметров зависит свариваемость металла?
3. Расскажите о технологии сварки сталей с удовлетворительной свариваемостью.
4. Какие требования предъявляются к сварке сталей с ограниченной свариваемостью?
5. От каких параметров зависит склонность стали к образованию трещин?
6. Какой свариваемостью обладает сталь 12Х18Н10Т?
7. Какой свариваемостью обладает сталь 10ХСНД?
8. Расскажите о технологии сварки стали 30ХГСЛ.
9. Расскажите о технологии горячей сварки чугуна.
10. Какой свариваемостью обладает сталь 40Х?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные сварочные технологии влекут за собой высокий уровень знаний. Специалист сварочного производства должен быть профессионально подготовленным и обладать компетенциями физико-химических и тепловых процессов, происходящих при различных способах сварки.

Студенты, изучившие дисциплины «Физико-химические и тепловые процессы при сварке» и «Теория сварочных процессов» обладают следующими компетенциями: способность обеспечивать технологичность изделий и процессов их изготовления; умение контролировать соблюдение технологической дисциплины при изготовлении изделий; способность разрабатывать технологическую и производственную документацию с использованием современных инструментальных средств; способность обеспечивать техническое оснащение рабочих мест с размещением технологического оборудования; умение осваивать вводимое оборудование; умение применять методы стандартных испытаний по определению физико-механических свойств и технологических показателей используемых материалов и готовых изделий.

В результате освоения дисциплины бакалавр будет:

- уметь назначать режимы на основные операции в технологических процессах изготовления изделий с заданными требованиями по форме, размерам и взаимному расположению поверхностей;
- уметь осуществлять выбор технологического оборудования для реализации конкретного технологического процесса получения неразъемного соединения с необходимыми эксплуатационными свойствами;
- владеть навыками выбора методов и способов получения неразъемных соединений, обеспечивающих минимальное тепловложение в обрабатываемое изделие;
- владеть навыками использования оптимальных методик новых физико-механических показателей материалов восстанавливаемых деталей и расходных материалов.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ИНп – сварка неплавящимся электродом в среде инертных газов.

КПД – эффективный коэффициент полезного действия дуги.

РДС – ручная дуговая сварка покрытыми электродами.

АФ – автоматическая сварка под слоем флюса.

ИН – механизированная сварка в среде инертных газов плавящимся электродом.

УП – механизированная сварка в среде углекислого газа плавящимся электродом.

ГОСТ – государственный стандарт.

ОСТ – отраслевой стандарт.

ВД – выпрямитель для дуговой сварки.

ТСП – теория сварочных процессов.

ФХиТП – физико-химические и тепловые процессы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория сварочных процессов : учебник для вузов / А.В. Коновалов, А.С. Куркин, Э.Л. Неровный и др. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 752 с.
2. Кривоносова Е.А. Теория сварочных процессов: моделирование физико-химических процессов в сварном шве : учебное пособие / Е.А. Кривоносова. – Пермь : ПНИПУ, 2014. – 93 с.
3. Дедюх Р.И. Теория сварочных процессов. Физические и технологические свойства электросварочной дуги : учебное пособие / Р.И. Дедюх. – 2-е изд. – Томск : ТПУ, 2013. – 118 с.
4. Ольшанская Т.В. Конструкционные материалы. Свариваемость и сварка : учебное пособие / Т.В. Ольшанская. – Пермь : ПНИПУ, 2015. – 242 с.
5. Макаров Э.Л. Теория свариваемости сталей и сплавов: монография / Э.Л. Макаров, Б.Ф. Якушин. – Москва : МГТУ им. Баумана, 2014. – 487 с.
6. Смирнов И.В. Сварка специальных сталей и сплавов : учебное пособие / И.В. Смирнов. – 3-е изд. стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 268 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Физические свойства металлов и сплавов

Металл	Температура плавления $T_{пл}$, К	Плотность ρ , г/см ³	Удельная теплоемкость, c_p , Дж/(г·К)	Теплопроводность λ , Вт/(см·К)	Удельное сопротивление материала r , мкОм·см	Скрытая теплота плавления $q_{пл}$, Дж/г
Низколегированная сталь	1773	7,8	0,47	0,48	15	270
Коррозионно-стойкая сталь	1732	7,9	0,49	0,15	80	270
Алюминий	933	2,7	0,96	2,2	2,8	390
Сплав алюминия (АМГ ₆)	903	2,6	0,92	1,2	6,7	390
Сплав алюминия (АМЦ)	927	2,7	1,09	1,8	4,1	390
Сплав алюминия (Д16)	911	2,77	0,84	1,7	4,3	390
Титан	1941	4,5	0,52	0,22	58	358
Сплав титана (ВТ6)	1941	4,4	0,54	0,08	160	358
Медь	1356	8,9	0,38	3,9	1,7	205
Латунь (Л63)	1183	8,5	0,38	1,1	1,7	205
Магний	924	1,7	1,05	1,7	4,5	357
Никель	1728	8,9	0,45	0,89	6,8	300

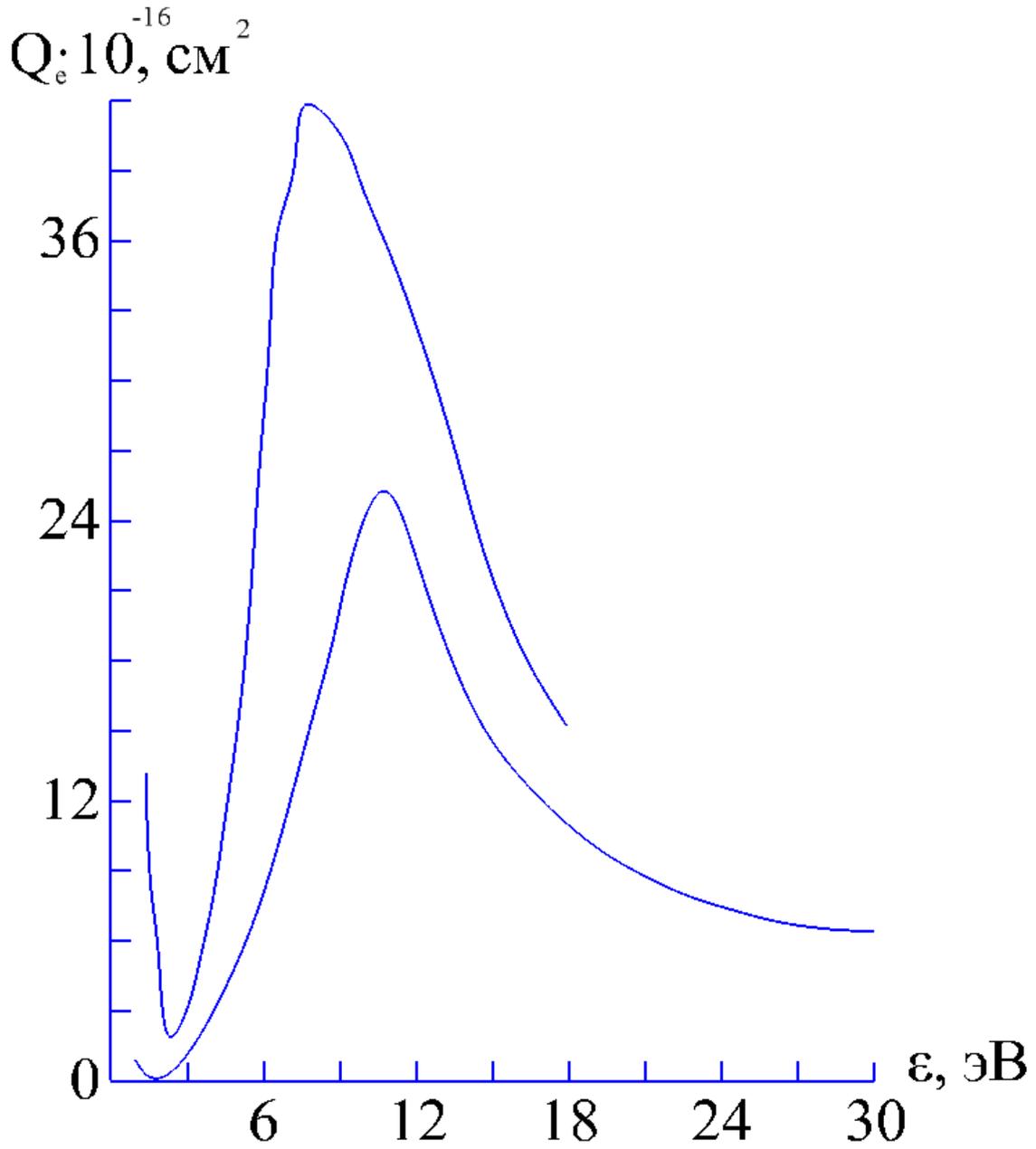
Приложение 2

Теплофизические свойства материалов

Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(см·К)	Объемная теплоемкость c_p , Дж/(см ³ ·К)
Низкоуглеродистая сталь	0,38...0,42	4,9...5,2
Аустенитная сталь	0,25...0,33	4,7...4,8
Медь	3,7...3,8	3,8...4,0
Латунь	1,2	3,4
Алюминий	2,7	2,7
Титан	0,17	2,8

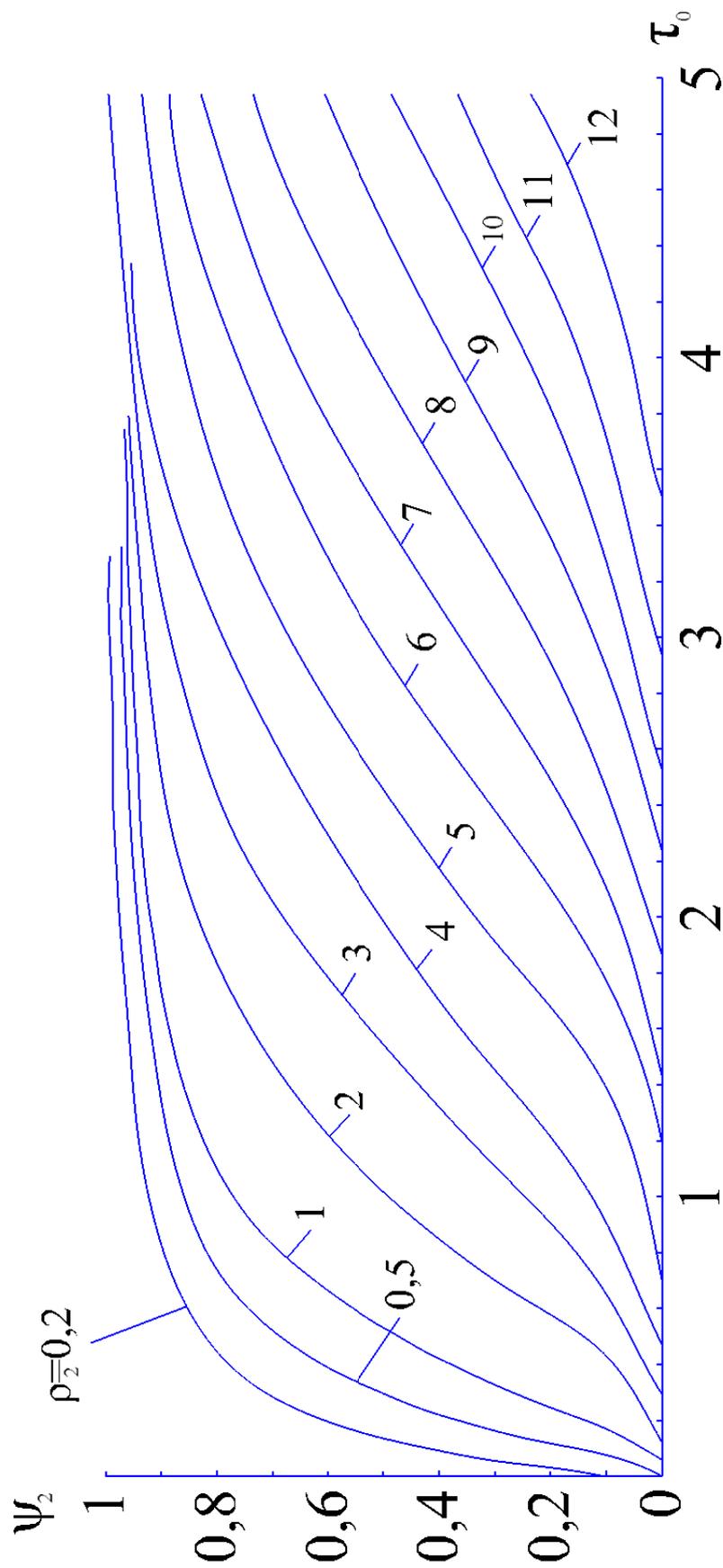
Приложение 3

Зависимость эффективного сечения Q_e для различных газов от энергии электронов по Рамзауэру



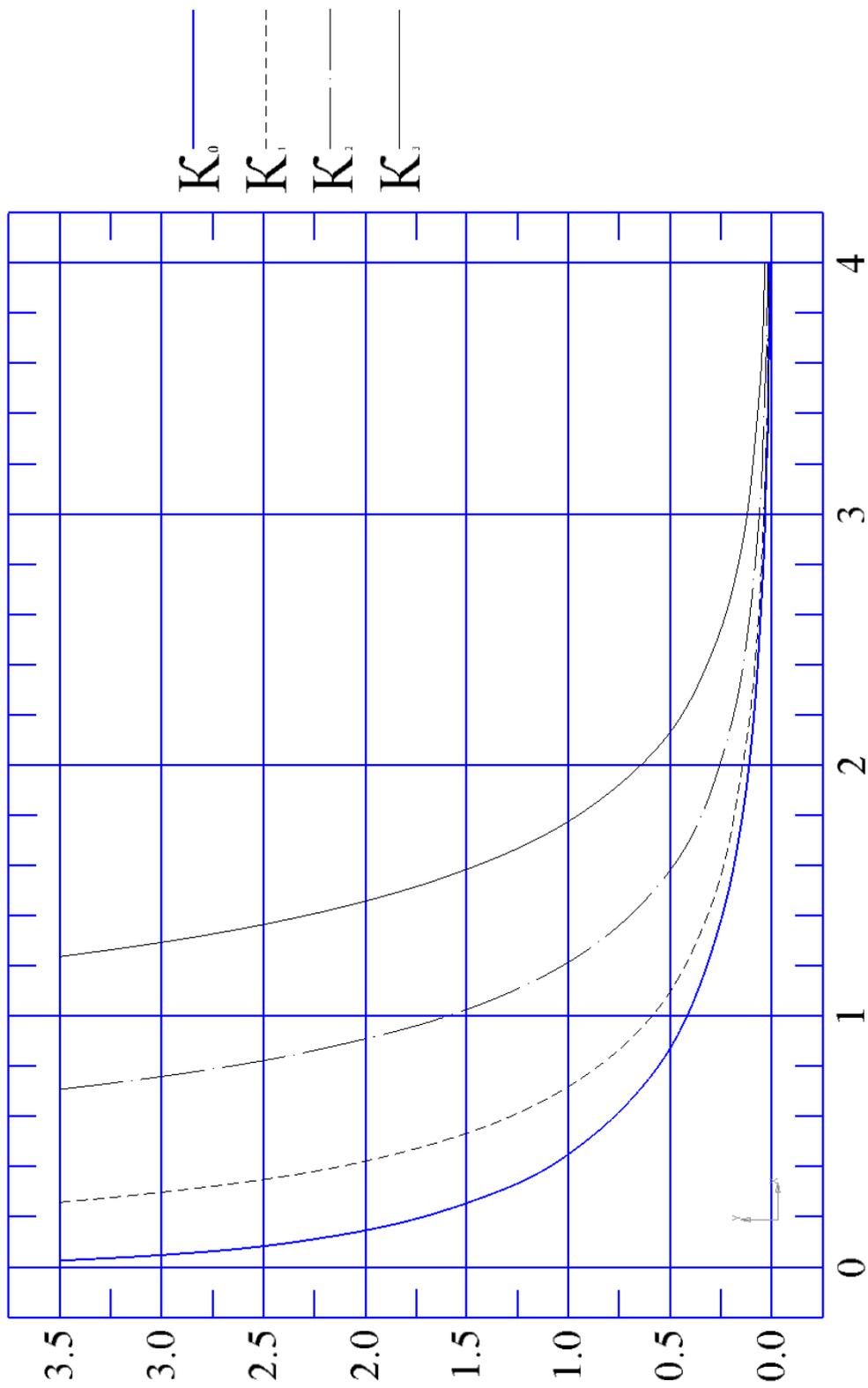
Приложение 4

Номограмма для определения коэффициента теплонасыщения:
для схемы линейного источника в бесконечной пластине



Приложение 5

График модифицированных функций Бесселя второго рода с различными порядками



Приложение 6

Структура отчета и правила его оформления

Отчет должен включать:

- титульный лист. Форма титульного листа представлена в прил. 7;
- цель работы;
- методику выполнения практической работы;
- результаты выполнения практических работ (формулы, значения расчетов т. д.);
- общий вывод.

Форма титульного листа отчета

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Юргинский технологический институт

(наименование учебной дисциплины)

Практическая работа № ____

(Название работы – прописными буквами)

Исполнитель

Студент гр. № _____

_____ И.О. Фамилия
(подпись, дата)

Руководитель

(должность, ученая степень, звание) _____ И.О. Фамилия
(подпись, дата)

Юрга 20__

Учебное издание

КУЗНЕЦОВ Максим Александрович
ИЛЬЯЩЕНКО Дмитрий Павлович

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВАРКЕ

Учебно-методическое пособие

Корректурa *Е.Л. Тен*
Компьютерная верстка *Д.В. Сотникова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Подписано к печати 12.09.2022. Формат 60x84/16 Бумага «Снегурочка».
Печать CANON. Усл. печ.л. 2,38. Уч-изд. л. 2,16.
Заказ 188-22. Тираж 100 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ