

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

Кафедра технологии машиностроения

“УТВЕРЖДАЮ”
ДЕКАН МТФ

к.т.н. Янпольский В. В.

“ ” _____ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
Основы электрофизических методов обработки

Образовательная программа: 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, профиль: Конструкторско-технологический

Курс: 4, семестр : 8

Механико-технологический факультет,

		Семестр
№	Вид деятельности	8
1	Всего зачетных единиц (кредитов)	3
2	Всего часов	108
3	Всего занятий в контактной форме, час.	34
4	Лекции, час.	12
5	Практические занятия, час.	0
6	Лабораторные занятия, час.	12
7	из них в активной и интерактивной форме, час.	0
8	Аттестация, час.	2
9	Консультации, час.	8
10	Самостоятельная работа, час.	74
11	Виды самостоятельной работы (курсовой проект, курсовая работа, РГЗ, подготовка к контрольной работе)	РГЗ
12	Вид аттестации	3

Рабочая программа составлена на основании федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению (специальности): 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств

ФГОС введен в действие приказом №1000 от 11.08.2016 г. , дата утверждения: 25.08.2016 г.

Место дисциплины в структуре учебного плана: Блок 1, вариативная, по выбору студента

Рабочая программа разработана на основе компетентностной модели выпускника по направлению (специальности): 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры

ТМС, протокол заседания кафедры №8 от 20.06.2017

Утверждена на совете механико-технологического факультета, протокол № 5 от 21.06.2017

Программу разработал:

Заведующий кафедрой:

профессор, д.т.н. Рахимянов Х. М.

Ответственный за образовательную программу:

заведующий кафедрой Рахимянов Х. М.

1. Внешние требования

Таблица 1.1

Компетенция ФГОС: ПК.4 способность участвовать в разработке проектов изделий машиностроения, средств технологического оснащения, автоматизации и диагностики машиностроительных производств, технологических процессов их изготовления и модернизации с учетом технологических, эксплуатационных, эстетических, экономических, управленческих параметров и использованием современных информационных технологий и вычислительной техники, а также выбирать эти средства и проводить диагностику объектов машиностроительных производств с применением необходимых методов и средств анализа; в части следующих результатов обучения:
34. знать технику - экономические показатели методов электрофизической обработки материалов
38. знать физические особенности процессов обработки материалов: электроэрозионная, электрохимическая, плазменная, лазерная и другие методы обработки

2. Требования НГТУ к результатам освоения дисциплины

Таблица 2.1

Результаты изучения дисциплины по уровням освоения (иметь представление, знать, уметь, владеть)	Формы организации занятий
<i>Основы электрофизических методов обработки</i>	
ПК.4.34 знать технику - экономические показатели методов электрофизической обработки материалов	
1. Знать методы оценки области применимости моделей конкретных технологических процессов, с учетом технико-экономических показателей.	Лекции; Самостоятельная работа
ПК.4.38 знать физические особенности процессов обработки материалов: электроэрозионная, электрохимическая, плазменная, лазерная и другие методы обработки	
2. Знать основные понятия процесса взаимодействия концентрированных потоков энергии с твердыми металлическими и неметаллическими материалами.	Лекции; Самостоятельная работа
3. Знать методы расчета основных параметров процесса при электрофизических методах обработки и режимов работы технологического оборудования.	Лекции; Самостоятельная работа
4. Знать алгоритмы применения методов математического моделирования при оптимизации технологических процессов в машиностроении.	Лекции; Самостоятельная работа
5. Знать методы моделирования процессов, происходящих в обрабатываемом материале при основных видах термической обработки.	Лекции; Самостоятельная работа
6. Уметь использования возможностей вычислительной техники и программного обеспечения для изучения конкретных технологических процессов.	Лекции; Самостоятельная работа

3. Содержание и структура учебной дисциплины

Таблица 3.1

Темы лекций	Активные формы, час.	Часы	Ссылки на результаты обучения
Семестр: 8			
Дидактическая единица: Моделирование и оптимизация ТП.			
1. Введение. Значение и место электрофизических методов обработки в машино и приборостроении.	0	1	1
2. Поверхностный и объемный источник.	0	1	1, 2
3. Краевые и начальные условия применительно к задачам термоупрочнения, сварки, резки, размерной обработки.	0	1	1, 2, 3, 5
4. Поверхностная термообработка(закалка, отпуск) материалов.	0	1	1, 3, 5

5. Сварка однородных и разнородных материалов в стык и внахлест.	0	2	1, 2, 3, 4, 5, 6
6. Размерная обработка.	0	2	1, 2, 3, 4, 5, 6
7. Давление пара в канале и время выхода на стационарный режим при микрообработке материалов	0	1	1, 2, 3, 4, 5, 6
Дидактическая единица: Технологический процесс и физические модели.			
8. Поверхностная термообработка (закалка, отпуск) материалов движущимся поверхностным тепловым источником.	0	2	1, 3, 5, 6
Дидактическая единица: Физические модели процессов электрофизической обработки.			
9. Тепловой источник как инструмент в термических методах обработки.	0	1	2

Таблица 3.2

Темы лабораторных работ	Активные формы, час.	Часы	Ссылки на результаты обучения	Учебная деятельность
Семестр: 8				
Дидактическая единица: Моделирование процесса лазерной резки неметаллических материалов непрерывным излучением				
1. Паспортизация лазерного комплекса ХЕБР-1. Влияние режимов обработки на производительность при резке неметаллических материалов на ЛТК ХЕБР-1.	0	4		Освоение основ и приемов работы на лазерном технологическом комплексе ХЕБР-1. Экспериментальное изучение закономерностей процессов резания с технологическими параметрами, задаваемыми с помощью органов управления машины.
Дидактическая единица: Моделирование процесса тонкоструйной плазменной резки металлических материалов				
2. Паспортизация машины термической резки. Влияние скорости резания, величины зазора между плазматроном и деталью на качество обработки при плазменной резке металлических материалов	0	4		Освоение основ и приемов работы на установке тонкоструйной плазменной резки. Экспериментальное изучение закономерностей процессов резания с технологическими параметрами, задаваемыми с помощью органов управления машины.
Дидактическая единица: Моделирование процесса лазерной маркировки металлических и неметаллических материалов импульсным воздействием				
3. Паспортизация установки лазерной маркировки МЛ2-1.	0	4		Освоение основ и приемов работы на установке лазерной маркировки. Экспериментальное изучение технологических возможностей и режимов при маркировке металлических и неметаллических материалов.

4. Самостоятельная работа обучающегося

№	Виды самостоятельной работы	Ссылки на результаты обучения	Часы на выполнение	Часы на консультации
Семестр: 8				
1	РГЗ	1, 2, 3, 4, 5, 6	34	8
структура пояснительной записки к расчетно-графической работе рекомендуется следующая: 1. Описание назначения и области применения заданного конструкционного материала и его и теплофизических характеристик. 2. Краткая сущность моделируемого технологического процесса: назначение, схема, технологические параметры. 3. Характеристика метода и модели заданного технологического процесса. 4. Результаты моделирования, графики, анализ, выводы. : Журавлев А. И. Основы электрофизических методов обработки [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие / А. И. Журавлев, Р. М. Кадырбаев ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, [2016]. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000233503. - Загл. с экрана.				
2	Подготовка к занятиям	1, 2, 3, 4, 5, 6	20	0
работа с конспектом лекции, т.е. дополнение конспекта учебным материалом (учебника, учебного пособия, первоисточника, дополнительной литературы, нормативных документов и материалом электронного ресурса и сети Интернет); чтение текста (учебника, учебного пособия); конспектирование текста (работа со справочниками, нормативными документами); подготовка к лабораторной работе, практическому и семинарскому занятию; решение задач и упражнений по темам лекций. : Организация самостоятельной работы студентов Новосибирского государственного технического университета : методическое руководство / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: Ю. В. Никитин, Т. Ю. Сурнина]. - Новосибирск, 2016. - 19, [1] с. : табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000234042				
3	Подготовка к аттестации	1, 2, 3, 4, 5, 6	20	0
чтение конспекта лекций; ответы на контрольные вопросы к зачету; решение задач и упражнений по темам лекций. : Журавлев А. И. Основы электрофизических методов обработки [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие / А. И. Журавлев, Р. М. Кадырбаев ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, [2016]. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000233503. - Загл. с экрана. Организация самостоятельной работы студентов Новосибирского государственного технического университета : методическое руководство / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: Ю. В. Никитин, Т. Ю. Сурнина]. - Новосибирск, 2016. - 19, [1] с. : табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000234042				

5. Технология обучения

Для организации и контроля самостоятельной работы обучающихся, а также проведения консультаций применяются информационно-коммуникационные технологии (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Деятельность	Информационно-коммуникационные технологии
Информирование	Портал НГТУ
Консультирование	e-mail:kaf_tms@corp.nstu.ru
Контроль	e-mail:kaf_tms@corp.nstu.ru
Размещение учебных материалов	ЭБС

6. Правила аттестации обучающихся по учебной дисциплине

Для аттестации обучающихся по дисциплине используется балльно-рейтинговая система (БРС), позволяющая выставить оценки по традиционной шкале и 15-уровневой ECTS. Краткая информация о БРС приведена в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Оцениваемые виды деятельности обучающихся	Мин. балл	Максимальный балл
Семестр: 8		
<i>Лекция:</i>	9	18
Контролирующие материалы приводятся в "Организация самостоятельной работы студентов Новосибирского государственного технического университета : методическое руководство / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: Ю. В. Никитин, Т. Ю. Сурнина]. - Новосибирск, 2016. - 19, [1] с. : табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000234042 "		
<i>Лабораторная:</i>	7	14
Контролирующие материалы приводятся в "Современные лазерные и плазменные технологии : методические указания / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: Х. М. Рахмиев и др.]. - Новосибирск, 2017. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000235310 "		
<i>РГЗ:</i>	24	48
Контролирующие материалы приводятся в "Журавлев А. И. Основы электрофизических методов обработки [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие / А. И. Журавлев, Р. М. Кадырбаев ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, [2016]. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000235303 . - Загл. с экрана."		
<i>Зачет:</i>	10	20
Контролирующие материалы (список вопросов) приводятся в "Организация самостоятельной работы студентов Новосибирского государственного технического университета : методическое руководство / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: Ю. В. Никитин, Т. Ю. Сурнина]. - Новосибирск, 2016. - 19, [1] с. : табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000234042 "		

В таблице 6.2 представлено соответствие форм контроля заявляемым требованиям к результатам освоения дисциплины.

Таблица 6.2

Коды компетенций ФГОС	Результаты обучения	Формы контроля	
		Защита РГЗ	Зачет
ПК.4	34. знать технику - экономические показатели методов электрофизической обработки материалов	+	+
	38. знать физические особенности процессов обработки материалов: электроэрозионная, электрохимическая, плазменная, лазерная и другие методы обработки	+	+

Фонд оценочных средств по дисциплине представлен в приложении № 1 к рабочей программе.

7. Литература

Основная литература

1. Григорьянц А. Г. Технологические процессы лазерной обработки : [учебное пособие для вузов по специальности "Машины и технология высокоэффективных процессов обработки материалов" направления "Машиностроительные технологии и оборудование"] / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров ; под ред. А. Г. Григорьянца. - М., 2008. - 663 с. : ил.
2. Григорьев С. Н. Технология обработки концентрированными потоками энергии : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств" / С. Н. Григорьев, Е. В. Смоленцев, М. А. Волосова. - Старый Оскол, 2009. - 278 с. : ил.

3. Архипова Н.А. Электрофизические и электрохимические методы обработки поверхностей [Электронный ресурс] / Н.А. Архипова, Т.А. Блинова— Электрон. текстовые данные.— Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ЭБС АСВ, 2012.— 305 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/28423.html>.— ЭБС «IPRbooks»

4. Физико-химические основы технологических процессов и обработки конструкционных материалов: Уч. пос./ Р.Г. Тазетдинов. - 2-е изд., доп. и испр. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 400 с.: 60x88 1/16. - (ВО: Бакалавриат). (п) ISBN 978-5-16-008967-6, 300 экз. - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=416469> - Загл. с экрана.

5. Современные технологии обработки металлов и сплавов: Сб. научно-тех. статей профессорско-препод. состава кафедры 'Технология обр.металлов давлением';- М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 252 с.: 60x90 1/16- (Научная мысль) (о) ISBN 978-5-16-010767-7, 500 экз. - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=501737> - Загл. с экрана.

Дополнительная литература

1. Рыкалин Н. Н. Лазерная обработка материалов / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, А. Н. Кокора. - М., 1975. - 295, [1] с. : ил.

2. Фотеев Н. К. Технология электроэрозионной обработки / Н. К. Фотеев. - М., 1980. - 183, [1] с. : табл., схемы

Интернет-ресурсы

1. ЭБС НГТУ : <http://elibrary.nstu.ru/>

2. ЭБС «Издательство Лань» : <https://e.lanbook.com/>

3. ЭБС IPRbooks : <http://www.iprbookshop.ru/>

4. ЭБС "Znanium.com" : <http://znanium.com/>

5. :

8. Методическое и программное обеспечение

8.1 Методическое обеспечение

1. Журавлев А. И. Основы электрофизических методов обработки [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие / А. И. Журавлев, Р. М. Кадырбаев ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, [2016]. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000233503. - Загл. с экрана.

2. Организация самостоятельной работы студентов Новосибирского государственного технического университета : методическое руководство / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: Ю. В. Никитин, Т. Ю. Сурнина]. - Новосибирск, 2016. - 19, [1] с. : табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000234042

3. Современные лазерные и плазменные технологии : методические указания / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: Х. М. Рахимьянов и др.]. - Новосибирск, 2017. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000235310

8.2 Специализированное программное обеспечение

1 MathCAD

2 Windows

3 Office

9. Материально-техническое обеспечение

Специальное оборудование

№	Наименование	Назначение
1	Лаборатория лазерных и плазменных технологий	Используется для проведения лабораторных и научно-исследовательских работ
2	Технологический лазерный комплекс ТЛК	Изучение влияния режимов обработки на качественные показатели при лазерной резке и сварке металлических материалов
3	Плазмотрон PERCUT 160-2, 1,5	Изучение влияния режимов обработки на качественные показатели при плазменной резке металлических материалов
4	Источник тока для установки плазменной резки Hi Focus 130	Используется совместно с плазмотроном PERCUT 160-2, 1.5
5	Устройство РВА-Н160 5MV. 11.820.243	Используется совместно с плазмотроном PERCUT 160-2, 1.5
6	Устройство PGE-НМ	Используется совместно с плазмотроном PERCUT 160-2, 1.5

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

Кафедра технологии машиностроения

“УТВЕРЖДАЮ”
ДЕКАН МТФ
к.т.н., доцент В.В. Янпольский
“ ” _____ Г.

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Основы электрофизических методов обработки

Образовательная программа: 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, профиль: Конструкторско-технологический

1. Обобщенная структура фонда оценочных средств учебной дисциплины

Обобщенная структура фонда оценочных средств по дисциплине основы электрофизических методов обработки приведена в Таблице.

Таблица

Формируемые компетенции	Показатели сформированности компетенций (знания, умения, навыки)	Темы	Этапы оценки компетенций	
			Мероприятия текущего контроля (курсовой проект, РГЗ(Р) и др.)	Промежуточная аттестация (экзамен, зачет)
ПК.4/ПК способность участвовать в разработке проектов изделий машиностроения, средств технологического оснащения, автоматизации и диагностики машиностроительных производств, технологических процессов их изготовления и модернизации с учетом технологических, эксплуатационных, эстетических, экономических, управленческих параметров и использованием современных информационных технологий и вычислительной техники, а также выбирать эти средства и проводить диагностику объектов машиностроительных производств с применением необходимых методов и средств анализа	34. знать технико - показатели методов электрофизической обработки материалов экономические	Введение. Значение и место электрофизических методов обработки в машино и приборостроении. Краевые и начальные условия применительно к задачам термоупрочнения, сварки, резки, размерной обработки. Паспортизация лазерного комплекса ХЕБР-1. Влияние режимов обработки на производительность при резке неметаллических материалов на ЛТК ХЕБР-1. Паспортизация машины термической резки. Влияние скорости резания, величины зазора между плазматроном и деталью на качество обработки при плазменной резке металлических материалов Паспортизация установки лазерной маркировки МЛ2-1. Поверхностная термообработка (закалка, отпуск) материалов движущимся поверхностным тепловым источником. Поверхностная термообработка(закалка, отпуск) материалов. Поверхностный и объемный источник. Размерная обработка. Сварка однородных и разнородных материалов в стык и внахлест.	РГЗ разделы 1	Зачет вопросы 1, 2, 3
ПК.4/ПК	38. знать физические особенности процессов обработки материалов: электроэрозионная, электрохимическая, плазменная, лазерная и другие методы обработки	Давление пара в канале и время выхода на стационарный режим при микрообработке материалов Краевые и начальные условия применительно к задачам термоупрочнения, сварки, резки, размерной обработки. Паспортизация лазерного комплекса ХЕБР-1. Влияние режимов обработки на производительность при резке неметаллических материалов	РГЗ разделы 2 - 6	Зачет Вопросы 4-23

		на ЛТК ХЕБР-1. Паспортизация машины термической резки. Влияние скорости резания, величины зазора между плазматроном и деталью на качество обработки при плазменной резке металлических материалов Паспортизация установки лазерной маркировки МЛ2-1. Поверхностная термообработка (закалка, отпуск) материалов движущимся поверхностным тепловым источником. Поверхностная термообработка(закалка, отпуск) материалов. Поверхностный и объемный источник. Размерная обработка. Сварка однородных и разнородных материалов в стык и внахлест. Тепловой источник как инструмент в термических методах обработки.		
--	--	---	--	--

2. Методика оценки этапов формирования компетенций в рамках дисциплины.

Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в 8 семестре - в форме зачета, который направлен на оценку сформированности компетенций ПК.4/ПК.

Зачет проводится в устной форме, по билетам. Студент готовится к вопросам в течении 15-30 минут, с обязательным кратким письменным изложением ответа на вопросы билета. После чего идет обсуждение изложенного материала с необходимыми устными дополнительными пояснениями.

Кроме того, сформированность компетенции проверяется при проведении мероприятий текущего контроля, указанных в таблице раздела 1.

В 8 семестре обязательным этапом текущей аттестации является расчетно-графическое задание (РГЗ). Требования к выполнению РГЗ, состав и правила оценки сформулированы в паспорте РГЗ.

Общие правила выставления оценки по дисциплине определяются балльно-рейтинговой системой, приведенной в рабочей программе дисциплины.

На основании приведенных далее критериев можно сделать общий вывод о сформированности компетенции ПК.4/ПК, за которые отвечает дисциплина, на разных уровнях.

Общая характеристика уровней освоения компетенций.

Ниже порогового. Уровень выполнения работ не отвечает большинству основных требований, теоретическое содержание курса освоено частично, пробелы могут носить существенный характер, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы не достаточно, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий не выполнены или выполнены с существенными ошибками.

Пороговый. Уровень выполнения работ отвечает большинству основных требований, теоретическое содержание курса освоено частично, но пробелы не носят существенного характера, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий выполнено, некоторые виды заданий выполнены с ошибками.

Базовый. Уровень выполнения работ отвечает всем основным требованиям, теоретическое

содержание курса освоено полностью, без пробелов, некоторые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы недостаточно, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество выполнения ни одного из них не оценено минимальным числом баллов, некоторые из выполненных заданий, возможно, содержат ошибки.

Продвинутый. Уровень выполнения работ отвечает всем требованиям, теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество их выполнения оценено числом баллов, близким к максимальному.

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»
Кафедра технологии машиностроения

Паспорт зачета

по дисциплине «Основы электрофизических методов обработки», 8 семестр

1. Методика оценки

Зачет проводится в устной форме, по билетам. Студент готовится к вопросам в течении 15-30 минут, с обязательным кратким письменным изложением ответа на вопросы билета. После чего идет обсуждение изложенного материала с необходимыми устными дополнительными пояснениями. Билет формируется по следующему правилу: первый вопрос выбирается из диапазона вопросов 1 - 11, второй вопрос из диапазона вопросов 12 - 23 (список вопросов приведен ниже).

Форма билета для зачета

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Факультет МТФ

Билет № _____

к зачету по дисциплине «Основы электрофизических методов обработки»

1. Преобразование энергии при электронно-лучевой, лазерной, плазменной, электроискровой обработках в тепловой источник.
2. Давление паров материала в зоне воздействия и его влияние на процесс преобразования воздействующей энергии в тепловой источник

Утверждаю: зав. кафедрой _____ д.т.н., профессор Рахимянов Х.М.
(подпись)

(дата)

2. Критерии оценки

- Ответ на билет для зачета считается **неудовлетворительным**, если студент при ответе на вопросы не дает определений основных понятий, не способен показать причинно-следственные связи явлений, оценка составляет 25-49 баллов.
- Ответ на билет для зачета засчитывается на **пороговом** уровне, если студент при ответе на вопросы дает определение основных понятий, может показать причинно-следственные связи явлений, в ответе допускается не принципиальные ошибки, например, вычислительные, оценка составляет 50-69 баллов.

- Ответ на билет для зачета билет засчитывается на **базовом** уровне, если студент при ответе на вопросы формулирует основные понятия, законы, дает характеристику процессов, явлений, проводит анализ причин, условий, может представить качественные характеристики процессов, оценка составляет *70-86 баллов*.
- Ответ на билет для зачета билет засчитывается на **продвинутом** уровне, если студент при ответе на вопросы проводит сравнительный анализ подходов, проводит комплексный анализ, выявляет проблемы, предлагает механизмы решения, способен представить количественные характеристики определенных процессов, приводит конкретные примеры из практики, не допускает ошибок и способен обосновать выбор метода решения технологической задачи, оценка составляет *87-100 баллов*.

3. Шкала оценки

Зачет считается сданным, если сумма баллов по всем заданиям билета оставляет не менее 50 баллов (из 100 возможных). Оценка за зачет учитывается в общей оценке по дисциплине с коэффициентом 0,2.

В общей оценке по дисциплине баллы за зачет учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Вопросы к зачету по дисциплине «Основы электрофизических методов обработки»

1. Значение электрофизических методов обработки в современном машиностроительном производстве и имеющиеся тенденции.
2. Существующие классификации электрофизических методов обработки.
3. Преобразование энергии при электронно-лучевой, лазерной, плазменной, электроискровой обработках в тепловой источник.
4. Пространственные, временные и энергетические характеристики тепловых источников.
5. Поверхностный и объемный источник, используемые критерии. Влияние вида источника на технологические возможности электрофизических методов обработки.
6. Тепловые потоки и температурные поля. Общее уравнение теплопроводности, краевые и начальные условия применительно к задачам термоупрочнения, сварки и размерной обработки.
7. Одномерные и неоднородные модели, критерии применимости.
8. Расчет термического цикла при термообработке импульсным воздействием поверхностного источника для одномерного случая. Общая постановка и используемые приближения. Определение максимальной температуры поверхности.
9. Расчет глубины проникновения изотерм (плавления, нагрева под закалку, отпуска).
10. Поверхностная термообработка (закалка, отпуск) движущимся поверхностным тепловым источником (движущаяся система координат). Технологические схемы.
11. Температурное поле при поверхностной термообработке движущимся Гауссовым тепловым источником по поверхности полубесконечного тела (движущаяся система координат). Используемые приближения.
12. Стационарный и нестационарный участок. Максимальная температуры поверхности. Расчет глубины проникновения изотерм (плавления, нагрева под закалку, отпуска) на стационарном участке.
13. Сварка однородных и разнородных материалов в стык и внахлест. Схемы соединения и

требуемый термический цикл.

14. Расчет температурного поля при сварке внахлест двух разнородных пластин поверхностным источником. Используемые приближения.

15. Максимальная температура поверхности первой пластины и температура стыка в безразмерных параметрах при сварке внахлест двух разнородных пластин поверхностным источником.

16. Термическая резка металлических материалов с удалением металла жидкой фазе. Энергетический баланс и производительность резки при наличии окислительных процессов и без них.

17. Гидродинамика жидкой фазы в зоне реза и ее влияние на качество реза при термической резке металлических материалов с удалением металла в жидкой фазе.

18. Физические процессы при размерной обработке с удалением материала в паровой фазе.

19. Расчет установившейся температуры поверхности и скорости ее движения в одномерном приближении в движущейся системе координат при импульсном воздействии поверхностного источника при размерной обработке с удалением материала в паровой фазе.

20. Время выхода процесса на стационарный режим в одномерном приближении в движущейся системе координат при импульсном воздействии поверхностного источника при размерной обработке с удалением материала в паровой фазе.

21. Энергетический баланс и оптимальный режим испарения

22. Давление паров материала в зоне воздействия и его влияние на процесс преобразования воздействующей энергии в тепловой источник.

23. Стадии формирования отверстия и влияние гидродинамики жидкой фазы в пристеночном слое на качество отверстия.

Паспорт расчетно-графического задания

по дисциплине «Основы электрофизических методов обработки», 8 семестр

1. Методика оценки

В рамках расчетно-графического задания по дисциплине студент должен для конкретной технологической операции и вида энергетического воздействия обосновать вид теплового источника (с использованием соответствующих критериев), выбрать соответствующую расчетную модель, произвести необходимые преобразования, выбрать теплофизических характеристик и проверку размерностей.

При выполнении расчетно-графического задания студенты должны использовать MathCad, провести анализ полученных расчетных характеристик с точки зрения обеспечения требуемых технологических результатов

Обязательные структурные части РГЗ.

1. Титульный лист
2. Общая характеристика технологического метода обработки заданного в РГЗ
3. Обоснование вида теплового источника с использованием соответствующих критериев
4. Обоснование расчетной модели (одномерной или не одномерной) с использованием соответствующих критериев
5. Выбор теплофизических характеристик и проверка их размерности и расчетных соотношений
6. Проведение расчетов и анализ полученных результатов

Защита производится на 12 учебной неделе 8-ого семестра.

2. Критерии оценки

- Работа считается **не выполненной**, если выполнены не все части РГЗ, отсутствует анализ технологической задачи, обоснование модели и теплового источника, неверно выбраны расчетные соотношения и в целом работа не соответствует требованиям, оценка составляет 25 - 49 баллов.
- Работа считается выполненной **на пороговом** уровне, если части РГЗ выполнены формально: анализ технологической задачи выполнен не в полном объеме, выбранная модель и расчетные соотношения недостаточно обоснованы, аппаратные средства не соответствуют современным требованиям, оценка составляет 50 - 69 баллов.
- Работа считается выполненной **на базовом** уровне, если анализ технологической задачи выполнен в полном объеме, выбранная модель и расчетные соотношения обоснованы, но формально, аппаратные средства соответствуют современным требованиям, есть недочеты в оформлении, оценка составляет 70 - 86 баллов.
- Работа считается выполненной **на продвинутом** уровне, если для конкретной технологической операции и вида энергетического воздействия обоснован вид теплового источника (с использованием соответствующих критериев), выбран соответствующая расчетная модель, произведены необходимые преобразования, проведена проверка размерностей, аппаратные средства соответствуют современным требованиям, работа оформлена в соответствии с требованиями, оценка составляет 87-100 баллов.

3. Шкала оценки

РГЗ считается сданным, если количество баллов оставляет не менее 50 (из 100 возможных). Оценка за РГЗ учитывается в общей оценке по дисциплине с коэффициентом 0,48.

В общей оценке по дисциплине баллы за РГЗ учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Примерный перечень тем РГЗ

Задания к РГР по теме: Поверхностная термообработка импульсным воздействием

Задание 1

Определить максимальную глубину распространения изотермы равную температуре закалки равной 900 °С и соответствующую ей глубину распространения изотермы равной температуре отпуска при поверхностной термообработке предварительно закаленной стали 45 без оплавления поверхностного слоя перемещающимся электронным пучком . Определить величину тока электронно-лучевой пушки при ускоряющем напряжении равном 30 000 в, и длительности импульса $6 \cdot 10^{-3}$ сек, диаметре пучка 4мм. Коэффициент преобразования мощности пучка в тепловой источник принять равным 1.

Задание 2

Определить максимальную глубину распространения изотермы равную температуре закалки равной 900 °С и соответствующую ей глубину распространения изотермы равной температуре отпуска при поверхностной термообработке предварительно закаленной стали 45 без оплавления поверхностного слоя перемещающимся лазерным лучом. Определить энергию импульса излучения при длительности импульса $4 \cdot 10^{-3}$ сек и диаметре луча 3 мм. Коэффициент поглощения равен 0,1. Распределение интенсивности по сечению пучка является однородным.

Задание 3

Определить максимальную глубину распространения изотермы равную температуре закалки равной 900 °С и соответствующую ей глубину распространения изотермы равной температуре отпуска при поверхностной плазменной термообработке, предварительно закаленной стали 45 без оплавления поверхностного слоя . Плазменный источник неподвижен. Диаметр плазменного источника на поверхности принять равным 5мм, распределение интенсивности по сечению принять однородным , длительность воздействия 0,1сек. Определить мощность плазменного источника полагая коэффициент преобразования его в мощность теплового источника равным 0,75. Распределение интенсивности по сечению пучка является однородным.

Задание 4

Определить максимальную глубину распространения изотермы равной температуре плавления и температуре закалки(равной 900 °С) при поверхностной термообработке стали 45 с оплавлением поверхностного слоя перемещающимся электронным пучком . Максимальная температура поверхности равна 2 Тпл. Определить величину тока электронно-лучевой пушки при ускоряющем напряжении равном 30 000 в, и длительности импульса $6 \cdot 10^{-3}$ сек, диаметре пучка 4мм .Коэффициент преобразования мощности пучка в

тепловой источник принять равным 0,9. Распределение интенсивности по сечению пучка является однородным

Задание 5

Определить максимальную глубину распространения изотерм равным температуре плавления и температуре закалки (900 °С) при поверхностной термообработке стали 45 с оплавлением поверхностного слоя неподвижным лазерным лучом. Максимальная температура поверхности принять равной 1,5Тпл. Определить энергию импульса излучения при длительности импульса $4 \cdot 10^{-3}$ сек и диаметре луча 3 мм. Коэффициент поглощения равен 0,1, распределение интенсивности по сечению принять однородным.

Задание 6

Определить максимальную глубину распространения изотерм равным температуре плавления и температуре закалки равной 900°С при поверхностной плазменной термообработке, с оплавлением поверхностного слоя . Максимальная температура поверхности равна 1,25 Тпл. Плазменный источник неподвижен.Диаметр плазменного источника на поверхности принять равным 5мм , распределение интенсивности по сечению принять однородным , длительность воздействия 0,1сек. Определить мощность плазменного источника полагая коэффициент преобразования его в мощность теплового источника равным 0,65.

Задания к РГР по теме: Поверхностная термообработка непрерывным движущимся термическим источником

Задание 7

Рассчитать (в движущейся системе координат) установившееся распределение температуры по глубине стали 45 в центре движущего со скоростью 10см / сек непрерывного электронного пучка с нормальным распределением интенсивности (Гаусов источник), ускоряющее напряжение электронно-лучевой пушки 20000 вольт ток луча 0,1А, коэффициент сосредоточенности 3 см^{-1} . Коэффициент преобразования мощности пучка в тепловой источник принять равным 1.

Задание 8

Рассчитать (в движущейся системе координат) установившееся распределение температуры на поверхности стали 45 вдоль оси X от воздействия непрерывно действующего луча лазера с нормальным распределением интенсивности по сечению луча (Гауссов источник) движущего со скоростью 10 см/сек, мощностью 2 кВт, коэффициент поглощения 0,1 , коэффициент сосредоточенности 3 см^{-1} .

Задания к РГР по теме: Микрообработка материалов импульсным воздействием

Задание 9

Определить толщину пластины стали 45, которую можно прошить одиночным импульсом от воздействия электронного луча с параметрами: Ускоряющее напряжение электронной пушки 30 кВ, импульсный ток 10А, длительность импульса 10^{-3} сек, диаметр сфокусированного луча 1 мм. Распределение интенсивности по сечению принять однородным. Определить давление паров в обрабатываемом отверстии в установившемся режиме.

Задание 10

Определить толщину пластины стали 45, которую можно прошить одиночным импульсом от воздействия лазерного луча с параметрами: энергия импульса 60 Дж, длительность импульса 10^{-3} сек, диаметр сфокусированного луча 1 мм, коэффициент поглощения 0,25. Распределение интенсивности по сечению принять однородным. Определить давление паров в обрабатываемом отверстии в установившемся режиме.

Задание 11

Определить массу удаляемого материала (сталь 45) одиночным импульсом при электроискровой обработке полагая диаметр искрового канала равным 0,1 мм, емкость конденсатора 100 мкФ., напряжение заряда конденсатора при котором происходит пробой диэлектрической среды равно 100 вольт, длительность искрового разряда равна 1 мксек, ток разряда в течении всей длительности разряда считать постоянным, энергия разряда равномерно распределена по диаметру канала, коэффициент преобразования энергии разряда в тепловой источник принять равным 1, источник считать поверхностным

Задание 12

Рассчитать зависимость удельного выноса материала $\Delta m / \Delta Q$ (отношение массы выброшенного материала к плотности энергии) от величины импульсного тока при электронно-лучевой прошивке вольфрама при равномерном распределении интенсивности по сечению пучка, длительности импульса 10^{-2} сек при ускоряющем напряжении 22 кВ, диаметре пучка 2 мм, и коэффициенте преобразования мощности пучка в тепловой источник равным 1

Задание 13

Определить зависимость величины удельного выноса циркония $\Delta m / \Delta Q$ (отношение массы выброшенного материала к плотности энергии) при электроискровой прошивке отверстий в зависимости от зарядной емкости (RC-генератор) при постоянном пробивном напряжении равно 100 вольт. Длительность импульса считать постоянной и равной $4 \cdot 10^{-6}$ сек, и диаметр разрядного канала равный 0,1 мм. Тепловой контакт идеален. Диаметр луча 1 мм. Коэффициент поглощения 0,15. Подвод мощности со стороны тонкой пластины.

Задание 14

Определить длительность и энергию импульса при микроплазменной сварке внахлест титановой пластинки толщиной 0,3 мм к титановому диску толщиной 10 мм, с условием, чтобы температура поверхности не превышала температуры кипения материала, а температура в месте контакта достигала $T_{\text{плавл}}$ материала. Тепловой контакт идеален. Диаметр зоны воздействия 2 мм. Коэффициент преобразования мощности плазмы в тепловой источник равен 0,75. Подвод мощности со стороны тонкой пластины.

Задание 15

Определить длительность импульса и импульсный ток при электронно-лучевой сварке внахлест танталовой пластинки толщиной 0,2 мм к танталовому диску толщиной 2 мм, с условием, чтобы температура поверхности не превышала температуры кипения материала, а температура в месте контакта достигала $T_{\text{плавл}}$ материала. Ускоряющее напряжение 20 кВ. Тепловой контакт идеален. Диаметр

луча 3,5 мм. Коэффициент преобразования мощности электронного пучка в тепловой источник равен 1. Подвод мощности со стороны тонкой пластины.

РУКОВОДЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ

1. Общие положения

В задании на расчетно-графическую работу для конкретной технологической операции и вида энергетического воздействия ставится прямая либо обратная задача.

В прямой задаче при заданных параметрах энергетического воздействия (плазменное, лазерное, электронно-лучевое, электро-эрозионное) расчетным способом необходимо произвести оценку достигаемого технологического результата.

Для поверхностной термообработки (закалки) определяемой величиной являются толщины оплавленной, закаленной и отпущенной зон, границы которых определяются по глубинам распространения соответствующих изотерм (температур плавления, фазовых переходов, и отпуска).

Для технологической операции сварки внахлест в общем случае разнородных материалов определяемыми величинами являются максимальная величина верхней (со стороны воздействующего источника) пластины, которую еще возможно приварить к нижней пластине.

Для процесса размерной обработки, в частности микрообработки, в этом случае определяемой величиной служит толщина пластины, которую можно прошить за один или заданное число импульсов.

В обратной задаче, исходя из требований, которые должен обеспечить технологический процесс необходимо определить параметры энергетического воздействия.

В связи с этим в качестве исходных данных к расчетно-графической работе выдаются:

- а) Вид энергетического воздействия (плазменное, лазерное, электронно-лучевое, электро-эрозионное) и его параметры.
- б) Технологическая операция (поверхностная закалка неподвижным или движущимся источником, сварка, размерная обработка)
- в) Материал заготовки

2. Анализ технологического процесса, определение типа источника и размерности модели

При выполнении расчетно-графической работы на основе анализа заданного технологического процесса и метода обработки, в качестве первого этапа необходимо определить параметры создаваемого теплового источника (энергетические, временные, и пространственные), а также произвести критериальную оценку характера распространения тепла в обрабатываемом изделии с установлением границ применимости одномерного приближения при моделировании протекающих процессов. После этого необходимо произвести математическое описание модели, с обоснованием выбранных расчетных соотношений. Следующим шагом необходимо по справочным данным определить теплофизические характеристики материала заготовки и привести их размерности в соответствии с расчетными соотношениями. Следует помнить, что при наличии ошибки в размерностях проведение дальнейших расчетов не имеет смысла. После проверки размерности необходимо проведение численных расчетов с использованием MatCad или в комбинации с графоаналитическим методом. Полученные результаты при необходимости должны быть представлены в виде графиков или таблиц с анализом полученных результатов, в том числе и с точки зрения оправданности применения выбранных моделей для данного технологического процесса.

Для всех технологических процессов связанных с термическим воздействием, где в качестве обрабатывающего инструмента выступает тепловой источник, вышеуказанный первый этап имеет общий подход к определению параметров создаваемого теплового источника и к определению возможности использования одномерного приближения.

Временные характеристики теплового источника и воздействующего энергетического источника, используемых в электрофизических технологиях, при обработке металлических материалов и сплавов, совпадают с погрешностью порядка $10^{-11} \div 10^{-12}$ сек.

Энергетические характеристики создаваемого теплового источника ($Q_{\text{тепл}}$) и воздействующего энергетического источника ($Q_{\text{возд}}$) отличаются друг от друга на величину связанную с коэффициентом преобразования ($K_{\text{пр}}$), который выдается в задании.

$$Q_{\text{тепл}} = K_{\text{пр}} \cdot Q_{\text{возд}} \quad (1)$$

Пространственные характеристики теплового источника определяются толщиной слоя $l_{\text{пр}}$, в котором происходит преобразование энергии воздействующего источника.

Тепловой источник можно считать поверхностным, если пренебрежение конечной величиной слоя (приравниванием ее к нулю), в котором происходит преобразование энергии воздействующего источника, не влияет существенно на процесс распространения тепла в теле и на результаты расчета температур. Это выполняется когда:

$$l_{\text{пр}} \gg l_{\text{тепл}} \quad (2)$$

$$l_{\text{тепл}} \approx (a t_{\text{возд}})^{1/2} \quad (3)$$

$l_{\text{тепл}}$ – толщина прогретого слоя за время воздействия - $t_{\text{возд}}$

$$\text{где } a = \chi / c \rho \quad (4)$$

$[a] = \text{см}^2/\text{сек}$ - коэффициент температуропроводности материала

$[\chi] = \text{дж}/\text{см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}$ - коэффициент теплопроводности материала

$[c] = \text{дж}/\text{г} \cdot \text{град}$ – теплоемкость материала

$[\rho] = \text{г}/\text{см}^3$ плотность материала

В случае электронно-лучевой обработки в технологическом диапазоне энергий ускоренных электронов (до 50 кэВ) длину пробега (δ) электронов можно определить пользуясь эмпирической формулой:

$$\delta = 10^{-5} U^{3/2} / \rho \quad (5)$$

где $[\delta] = \text{см}$, если $[U] = \text{кэВ}$; $[\rho] = \text{г}/\text{см}^2$

При лазерной обработке проникновение электромагнитной волны вглубь материала описывается законом Бугера:

$$I(x) = I_0 \exp(-k_3 x) \quad (6)$$

Где k_3 – коэффициент экстинкции $[k_3] = \text{см}^{-1}$

Для металлов $k_3 = 10^4 \div 10^5 \text{ см}^{-1}$ и является функцией длины волны света температуры материала.

Таким образом толщина слоя материала, пройдя который интенсивность электромагнитной волны уменьшится в e – раз будет равна $1/k_3$, а для уменьшения в e^2 раз необходима толщина $2/k_3$. Для оценок можно принять $l_{\text{пр}} = 2/k_3$

При плазменной обработке передача энергии от плазменной струи к телу происходит за счет:

- а) поглощения световой энергии, излучаемой плазмой
- б) бомбардировки заряженными частицами тела
- г) конвективная передача тепла при обтекании поверхности тела плазменной струей.
- д) выделение Джоулевого тепла при замыкании тока дуги на деталь.

Передача энергии за счет поглощения света бомбардировки заряженными частицами происходит в слоях, толщины которых можно вычислить по формулам, приведенным для случаев электронно-лучевой и лазерной обработки. Конвективный теплообмен происходит только на поверхности и обеспечивает поверхностный источник тепла. Растекание тока при плазменной обработке происходит в объеме тела и эту часть мощности представляет собой объемный тепловой источник (составляет приблизительно $10 \div 30\%$ от мощности плазменной струи)

При электро-эрозионной обработке процесс передачи энергии, в общем происходит по тем же каналам, что и при плазменной обработке, за исключением того, что из-за малого

диаметра искрового канала (менее 0,1мм) доля энергии в тепловом источнике обеспечиваемая за счет протекания тока увеличивается до (40÷70%). Это, а также то, что часть энергии передается ударной волной, приводит к необходимости учета объемного характера образующегося источника тепла.

Критерии одномерности

Используя полученные данные для заданной технологической задачи можно обоснованно произвести математическое описание модели, с выбранных расчетных соотношений.

3. Поверхностная термообработка (закалка)

В зависимости от того в каком месте техпроцесса находится операция поверхностной термообработки возникает необходимость расчета либо толщины оплавленного слоя, либо закаленной зоны, и отпущенного слоя или в их комбинации. Так, например, если операция поверхностной термообработки является финишной операцией, то процесс ведется без оплавления поверхности и соответственно $x_{пл} = 0$. Необходимость расчета толщины отпущенного слоя возникает при поверхностной термообработке изделий с перекрытием отдельных зон, а также прошедших предварительную объемную закалку. В во всех этих случаях границы зон определяются глубинами распространения соответствующих изотерм, которые и подлежат нахождению.

4. Поверхностная термообработка неподвижным источником

В заданиях возможны схемы с подвижным и неподвижными источниками. Для импульсной обработки, когда смещение зоны воздействия за время импульса значительно меньше самой зоны воздействия, можно тепловой источник считать неподвижным. Тогда при постоянных теплофизических коэффициентах, в одномерном приближении, поверхностном источнике тепла:

$$q(t) = \begin{cases} q_0 & t < \tau_{и} \\ 0 & t \geq \tau_{и} \end{cases} \quad (7)$$

Тогда температуру в любой точке x в любой момент времени t можно определить по уравнению:

$$T(x,t) = \begin{cases} 2q_0 \cdot a^{1/2} \cdot \chi^{-1/2} \cdot t^{1/2} \cdot \text{ierfc}(x/(4at)^{1/2}) & t < \tau_{и} \\ 2q_0 \cdot a^{1/2} \cdot \chi^{-1/2} \cdot \{ t^{1/2} \cdot \text{ierfc}(x/(4at)^{1/2}) - (t - \tau_{и})^{1/2} \cdot \text{ierfc}(x/(4a(t - \tau_{и}))^{1/2}) \} & t \geq \tau_{и} \end{cases} \quad (8)$$

где $\text{ierfc}(x/(4at)^{1/2})$ - интеграл от функции ошибок (см. Приложение №1)
Откуда получается выражение для температуры поверхности ($x=0$)

$$T(0,t) = \begin{cases} 2q_0(\chi \cdot c \cdot \rho \cdot \pi)^{1/2} \cdot t^{1/2} & t < \tau_{и} \\ 2q_0(\chi \cdot c \cdot \rho \cdot \pi)^{1/2} \{ t^{1/2} - (t - \tau_{и})^{1/2} \} & t \geq \tau_{и} \end{cases} \quad (9)$$

Температура поверхности к концу действия импульса $t=\tau_{и}$ достигнет своего максимального значения и будет равна:

$$T(0, \tau_{и}) = T_{пов} = 2q_0(\chi \cdot c \cdot \rho \cdot \pi)^{1/2} \cdot \tau_{и}^{1/2} \quad (10)$$

Уравнение (8) в принципе позволяет построить профиль распределения температур, откуда можно найти искомые значения глубин распространения интересующих изотерм, что, однако, достаточно трудоемко.

Если за t_0 - обозначить время, когда на глубине x температура достигнет своего максимального значения, то из (8) можно получить распределение максимальных температур T_i в момент времени $t_0 > \tau_{и}$ в виде:

$$T_i = T_{пов} \cdot (\pi / \tau_{и})^{1/2} \cdot \{ t_0^{1/2} \cdot \text{ierfc}((t_0 - \tau_{и})/t_0) \ln(t_0/(t_0 - \tau_{и}))^{1/2} - (t_0 - \tau_{и})^{1/2} \cdot \text{ierfc}((t_0 / \tau_{и}) \ln(t_0/(t_0 - \tau_{и}))^{1/2}) \} \quad (11)$$

Введя безразмерную величину $k_i = t_0 / \tau_{\text{и}}$ (12)

получим: $T_i / T_{\text{пов}} = \varphi(k_i)$ (13)

где $\varphi(k_i) = \pi^{1/2} \{ k_i^{1/2} \operatorname{ierfc}((k_i-1)\ln(k_i/(k_i-1))^{1/3})^{1/2} - (k_i-1)^{1/2} \operatorname{ierfc}(k_i \ln(k_i/(k_i-1))^{1/2})^{1/2} \}$ (14)

Соответственно, глубина X_i , которую достигнет изотерма T_i будет равна:

$$X_i = (a \tau_{\text{и}})^{1/2} \cdot 2(k_i(k_i-1)\ln(k_i/(k_i-1))^{1/2})^{1/2} \quad (15)$$

Таким образом для прямых задач, при заданных параметров воздействия, вычисляется по уравнению (10) значение температуры поверхности в конце импульса, после чего, для каждой изотермы T_i из уравнения (13) находятся соответствующие им значения безразмерной величины k_i , подставив которые в уравнение (15) находятся глубины распространения требуемых изотерм.

5. Поверхностная термообработка движущимся источником

При поверхностной термообработке движущимся источником распределение плотности мощности по сечению зоны воздействия на поверхности принимается осесимметричным и описывается уравнением Гаусса:

$$q(r) = q_0 \cdot \exp(-\sigma \cdot r^2) \quad (16)$$

где $[\sigma] = \text{см}^{-2}$ - коэффициент сосредоточенности

Принимая по аналогии с предыдущим за эффективный радиус зоны воздействия, радиус r_0 на котором плотность мощности уменьшается в e^2 раз получим выражение для r_0 в виде:

$$r_0 = (2/\sigma)^{1/2} \quad (17)$$

Тогда соотношение, связывающее полную мощность P_0 , плотность мощность в центре зоны воздействия q_0 , и коэффициент сосредоточенности будет иметь вид:

$$P_0 = \pi \cdot q_0 / \sigma \quad (18)$$

Если систему координат связать с движущимся со скоростью v в направлении оси x источником то температура в любой точке $A(x,y,z)$ в момент времени t , будет равна:

$$T(x, y, z, t) = \frac{2P_0 \exp(-\mathcal{G}x/a)}{c\rho(4\pi a)^{3/2}} \times \int_0^t \frac{d\zeta}{(t_0 + \zeta)\sqrt{\zeta}} \times \exp\left(-\frac{z^2}{4a\zeta} - \frac{r^2}{4a(t_0 + \zeta)} - \frac{v^2(t + \zeta)}{4a}\right) \quad (19)$$

Из (19) видно, что со временем рост температуры в произвольной точке $A(x,y,z)$ (в движущейся системе координат) прекратится. В предельном случае при $t = \infty$ распределение температур в цилиндрической системе координат, движущейся со скоростью v в направлении оси x , будет иметь вид:

$$T(r, \varphi, z, \infty) = T_c \exp(-2\sqrt{np} \cos \varphi) \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{d\omega}{1 + \omega^2} \exp\left(-\frac{m}{\omega^2} - \frac{n}{1 + \omega^2} - p(1 + \omega^2)\right) \quad (20)$$

где $r^2 = x^2 + y^2$ $m = \sigma z^2$; $n = \sigma r^2$; $t_0 = 1/4a\sigma$; $p = \mathcal{G}^2 t / 4a$

φ – угол между радиусом вектором r и осью x

$$T_c = T(0,0,0, \infty) = \frac{P_0}{2\chi} \sqrt{\frac{\sigma}{\pi}} \quad (21)$$

T_c - установившаяся температура в центре системы координат при скорости перемещения $v=0$

В реальной точке тела, находящейся под действием перемещающегося источника, температура нарастает до своего максимального значения и затем понижается обратно. Для расчета термического цикла в конкретной точке тела, необходимо вычислить температуру в этой точке в разные моменты времени t , причем в уравнение (20) время t войдет неявно, через координату x в подвижной системе по формуле:

$$x = x_n - \mathcal{G}t \quad (22)$$

x_n π -координата точки в неподвижной системе

В начальный момент времени $t = 0$ системы координат совпадают, и их положение относительно некторой искомой точки $A(x,y,z)$ нужно выбрать так, чтобы: $x = x_n \geq r_0$

$$r_0 \approx \sqrt{\frac{2}{\sigma}}$$

что даст возможность рассчитать как стадию нагрева, так и стадию охлаждения. Таким способом вычисляется весь термический цикл в различных точках и графоаналитически можно определить размеры зон плавления, закалки и отпуска, скорости нагрева и охлаждения, а также градиенты температур.

6. Некоторые практические рекомендации

1. При выполнении расчетов в MatCad по уравнению (20) в верхнем пределе интеграла вместо ∞ лучше поставить число В, значение которого, при небольших m и n , определяется величиной p и которое можно принять равным:

$$B = (10^2/p)$$

2. При выполнении расчетов в MatCad по уравнению (14-15) следует использовать следующее рекуррентное соотношение:

$$\begin{aligned} \text{ierfc}(a) &= \pi^{-1/2} \exp(-a^2) - a \text{ierfc}(a) \\ \text{ierfc}(\infty) &= 0 ; \quad \text{ierfc}(0) = \pi^{-1/2} \end{aligned}$$

В приложении 1 приведены, для справки, значения интеграла от функции ошибок $\text{ierfc}(a)$, а также дополнение к функции ошибок $\text{erfc}(a)$ от аргумента a .

Приложение 1

(α)	$\text{erfc}(\alpha)$	$\text{ierfc}(\alpha)$
0,00	1,0	0,5642
0,05	0,9436	0,5156
0,10	0,8875	0,4698
0,15	0,8320	0,4268
0,20	0,7773	0,3866
0,25	0,7237	0,3491
0,30	0,6713	0,3142
0,35	0,6206	0,2819
0,40	0,5716	0,2521
0,45	0,5245	0,2247
0,50	0,4795	0,1997
0,55	0,4367	0,1767
0,60	0,3961	0,1559
0,65	0,3579	0,1371
0,70	0,3222	0,1201
0,75	0,2888	0,1048
0,80	0,2579	0,0911
0,85	0,2293	0,0790
0,90	0,2031	0,0682
0,95	0,1791	0,0586
1,00	0,1573	0,0502
1,10	0,1198	0,0364
1,20	0,0897	0,0260
1,30	0,0660	0,0183
1,40	0,0477	0,0126
1,50	0,0339	0,0086

Значения теплофизических величин для различных материалов можно найти:

1. Таблицы Физических величин. Справочник. Под ред. акад. И. К. Кикоина. М., Атомиздат, 1976, 1008 с.

