

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования

«Витебский государственный технологический университет»

(УО «ВГТУ»)

621.783

УДК 621.78.065.2

№ ГР 20042282

Утверждаю

Проректор по научной работе

УО «ВГТУ»

С.М. Литовский

2005 г.



ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**ИССЛЕДОВАНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ
ЗАТВЕРДЕВАНИЯ И НАГРЕВА НЕПРЕРЫВНО ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК**

(заключительный)

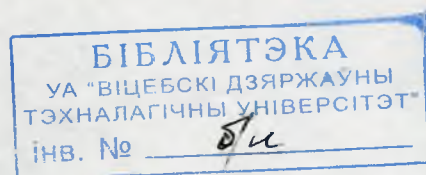
2004-Г/Б-327

Научный руководитель к.т.н. Ротенберг В.Е. Ротенберг

Начальник НИСа Беликов С.А. Беликов



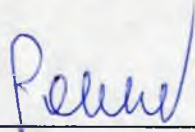
Витебск, 2005




СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

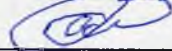
Руководитель темы

К.т.н., доцент

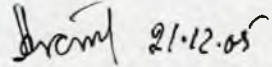
 23.12.05 В.Е. Ротенберг
(введение, разделы 1, 2, 4, 5, 6, 8, 10, заключение)

Исполнители темы


К.т.н., ведущий научный сотрудник 24.12.05  Д.Н. Андрианов
(разделы 3, 5, 10)

К.т.н., ведущий научный сотрудник 23.12.05  С.М. Кабишов
(разделы 3, 5, 10)

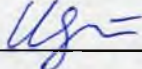
К.ф.м.н., доцент

 21.12.05 А.А. Котов
(разделы 1, 2, 5, 10)

К.т.н., доцент

 23.12.05 В.Н. Лабовкин
(разделы 2, 4)

К.ф.м.н., старший научный сотрудник

21.12.05  И.В. Файн
(разделы 4, 5, 6, 7, 9, 10, заключение, приложения)

Нормоконтролер

 А.С. Скрובה

РЕФЕРАТ

Отчет 184 с., 39 рис., 4 табл., 74 источника, 2 прил.

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ ПЕЧЬ, ЗАГОТОВКА, ТВЕРДОЕ ДЕФОРМИРУЕМОЕ ТЕЛО, УГЛЕРОДИСТАЯ СТАЛЬ, ПЛАСТИЧНОСТЬ, ПОЛЗУЧЕСТЬ, ДЕФОРМАЦИЯ, НАПРЯЖЕНИЕ, ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ, ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ, ЛИНЕЙНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ТЕМПЕРАТУРНОГО РАСШИРЕНИЯ, ДИФФУЗИОННЫЕ ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПЕРВОГО РОДА, ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ, ДИФФУЗИЯ, ДИСЛОКАЦИЯ.

Объектом исследования является призматическая (прямоугольного сечения) заготовка, нагреваемая в металлургической печи.

Цель работы – разработка расчетно-теоретической модели нагрева и формирования термовязкоупругопластических деформаций и напряжений в заготовке, учитывающей и диффузионные фазовые превращения первого рода.

В процессе работы проводился анализ теоретических и экспериментальных исследований термонагружения.

Рассмотрена возможность адаптации теоретической модели к условиям работы промышленного комплекса Республики Беларусь.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ НАГРЕВЕ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ.....	8
1.1 Аналитические решения.....	8
1.2 Приближенные аналитические решения.....	9
2 ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ЗАГОТОВОК ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКАХ.....	11
2.1 Анализ численных методов.....	11
2.2 Расчет нагрева призматической заготовки.....	12
3 РЕЗУЛЬТАТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НАГРЕВА ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ.....	14
4 РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕРМОУПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ В ЗАГОТОВКЕ ПРИ НАГРЕВЕ.....	16
4.1 Вывод уравнения.....	16
4.2 Методы решения.....	19
4.3 Алгоритм расчета.....	20
4.3.1 Определение A_o, A_x, A_y	20
4.3.2 Поверхность пластических деформаций и пространство деформирования.....	21
4.3.3 Виды деформирования элемента тела.....	23
4.3.3.1 Активное нагружение.....	23
4.3.3.2 Нейтральное нагружение.....	23
4.3.3.3 Разгрузка.....	23
4.3.3.4 Обратное течение.....	24
4.4 Апробация расчетно-теоретической модели.....	26

5	ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ НАГРЕВЕ ЗАГОТОВОК.....	33
5.1	Тепловые и механические свойства сталей при повышенных температурах.....	33
5.2	Примеры расчета нагрева заготовки прямоугольного сечения.....	34
5.2.1	Симметричный квазистационарный нагрев	37
5.2.2	Несимметричный квазистационарный нагрев	44
6	АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФАЗОВЫХ И УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ В ЗАГОТОВКАХ ПРИ НАГРЕВЕ.....	51
6.1	Фазовые переходы и методы механики твердого деформируемого тела.....	51
6.2	Фазовые превращения и высокотемпературная пластичность.....	53
6.3	Влияние фазовых превращений на деформации и напряжения при нагреве стальных заготовок (феноменологический подход).....	56
6.3.1	Тепловые эффекты при фазовых превращениях.....	57
6.3.2	Изменения объема.....	58
6.3.3	Изменения упругих и пластических свойств.....	59
6.3.4	Алгоритм расчета деформаций и напряжений в нагреваемой заготовке с учетом фазового превращения..	61
7	ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ФАЗОВОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ ЗАГОТОВОК.....	63
7.1	Расчет температурных полей.....	63
7.2	Симметричный нагрев заготовок.....	64

7.3 Несимметричный нагрев заготовок.....	72
8 РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ ВЯЗКОУПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ НАГРЕВЕ ЗАГОТОВОК.....	83
8.1 Механизмы и определяющие уравнения деформаций ползучести.....	83
8.2 Полная система уравнений термовязкоупругопластичности.....	90
9 ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВЯЗКОУПРУГО- ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ НАГРЕВЕ ЗАГОТОВОК.....	93
9.1 Модель деформации ползучести.....	93
9.2 Симметричный квазистационарный нагрев заготовок.....	94
9.3 Несимметричный квазистационарный нагрев заготовок.....	100
10 ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ И ВОЗМОЖНОСТЬ АДАПТАЦИИ РАЗРАБОТАННЫХ РАСЧЕТНО- ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ К ПОЛУЧЕНИЮ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПРОДУКЦИИ.....	105
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	109
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	110
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	129

ВВЕДЕНИЕ

Цель настоящей работы – разработать метод определения деформаций и напряжений при нагреве призматических заготовок в металлургических печах.

В общем случае решение такой задачи при переменных температурных нагрузениях следует искать как решение связанной динамической задачи термоупругости [1-3].

Однако при реальных скоростях нагрева, которые имеют место в металлургии, и при реальном эффекте связанности температуры и деформации в рассматриваемом твердом теле [4,5], задачу можно упростить и решать ее как несвязанную квазистатическую задачу термоупругости [1-3].

Высокотемпературный нагрев заготовки в металлургической печи является нестационарной нелинейной задачей термомеханики твердого деформируемого тела, так как нагрев вызывает изменения физико-механических характеристик материала заготовки и фазовые превращения. При этом возникают нестационарные напряжения и могут возникнуть деформации пластичности и ползучести.

Учет эволюции поля деформаций и напряжений является необходимым условием оптимизации выпуска качественной продукции и экономии энергии.

Поэтому разработка расчетно-теоретической модели образования деформаций и напряжений в заготовке при нагреве является актуальной задачей современной металлургии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Новацкий В. Теория упругости: Пер. с польск.-М.: «Мир», 1975.-872 с.
- 2 Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений: Пер. с англ.-М.: «Мир», 1964.- 518 с.
- 3 Коваленко А.Д. Основы термоупругости. -Киев: «Наукова думка», 1970.-308 с.
- 4 Takeuti Y. Foundations for coupled thermoelasticity// J. of Thermal Stresses.-1979.-V.2, №3-4. P.323-339.
- 5 Takeuti Y., Furukawa T. Some considerations on thermalshock problems in a plate// Transactions of the ASME. J. of Applied Mechanics.-1981.- V.48, march. – P.113-118.
- 6 Гольдфарб Э.М. Теплотехника металлургических процессов. -М.: «Металлургия», 1967.- 440 с.
- 7 Лыков А.В. Справочник. Изд. 2-е. М.: «Энергия», 1978. – 480 с.
- 8 Лыков А.В. Методы решения нелинейных уравнений нестационарной теплопроводности // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.- 1970. №5.- С. 109-150.
- 9 Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. - М. «Наука», 1975. – 228 с.
- 10 Коздоба Л.А. Решение нелинейных задач теплопроводности. Киев: «Наукова думка», 1976.- 136с.
- 11 Био М. Вариационные принципы в теории теплообмена: Пер. с англ. - М. : «Энергия», 1975.- 209 с.
- 12 Пол Ф. Процесс распространения тепла в конструкции летательных аппаратов: Сб.ст. // Проблемы высоких температур в авиационных конструкциях: Пер. с англ. -М.: ИЛ, 1961.- С. 49-72.
- 13 Кудряшов Л.И., Меньших Н.Л. Приближенные решения нелинейных задач теплопроводности. – М.: «Машиностроение», 1979.- 232 с.

- 14 Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: Справочник/ Под ред. Б.Е. Неймарк.- М.- Л. : «Энергия», 1967.- 240 с.
- 15 Фридман А. Уравнения с частными производными параболического типа: Пер. с англ.- М.: «Мир», 1968.- 428 с.
- 16 Марчук Г.И. Методы вычислительной математики.-Изд.2-е, перераб. и дополн. – М.: «Наука», 1980.- 536 с.
- 17 Годунов С.К., Рябенский В.С. Разностные схемы. Введение в теорию. – Изд. 2-е, перераб. и дополн.- М.: «Наука», 1977.- 440 с.
- 18 Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. В двух томах: Пер. с англ.- М. «Мир», 1990. Т.1- 384 с., т.2.- С.394 – 728.
- 19 Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена: Пер. с англ. -М.: «Мир», 1988.-544 с.
- 20 Бек Дж., Блакуэлл Б., Сент-Клэр Ч., мл. Некорректные обратные задачи теплопроводности: Пер. с англ. -М.: «Мир», 1989.- 312 с.
- 21 Самойлович Ю.А. Тимошпольский В.И. Нагрев стали. Справочное пособие. -Минск: «Вышэйшая школа», 1990.- 316 с.
- 22 Разработка численного алгоритма, составление и отладка программных кодов для расчета характеристик переноса излучения в рабочем пространстве кольцевой печи. Аннотированный отчет по этапу 1,2, ГПШИ «Высокоэнергетические технологии-47». Минск: ИТМО, май 2004 г.- 16 с.
- 23 Арсенин В.Я. Методы математической физики и специальные функции. -М.: «Наука», 1974.- 432 с.
- 24 Хан Х. Теория упругости. Основы линейной теории и ее применение: Пер. с нем.- М: «Мир», 1988.—344 с.
- 25 Мендельсон, Сперо. Общее решение упруго-пластического температурного напряженного состояния пластинки из упрочняющегося материала с произвольными свойствами// Прикладная механика: Русск. пер.- 1962.-№1.-С.168-176.

- 39 Марочник сталей и сплавов/ Под ред. Зубченко А.С. – 2е изд. – М.: «Машиностроение», 2003.- 782 с.
- 40 Любов Б.Я. Кинетическая теория фазовых превращений. – М. : «Металлургия», 1969 . – 264 с.
- 41 Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. – М. : «Металлургия», 1974. – 400 с.
- 42 Физическое металловедение / Под ред. Р. Кана. Вып. 2. Фазовые превращения. Metallographia : Пер. с англ. – М. : «Мир», 1968. – 492 с.
- 43 Физическое металловедение. В трех томах. Изд. третье, перераб. и доп. / Под ред. Р.У. Канна и П. Хаазена. Том 2. Фазовые превращения в металлах и сплавах и сплавы с особыми физическими свойствами : Пер. с англ. – М. : «Металлургия», 1987. – 624 с.
- 44 Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. Том 2 : Пер. с англ . – М. : « Мир», 1969 . – 864 с.
- 45 Пэжина П., Савчук А. Проблемы термопластичности : Сб. ст. // Проблемы теории пластичности и ползучести : Пер. с англ. - М. : « Мир», 1979. – С. 94 – 202 .
- 46 Кондауров В.И., Никитин Л.В. Термомеханика фазовых переходов в упруго-вязкопластической среде при конечных деформациях : Сб. ст. // Математические методы механики деформируемого твердого тела . – М. : «Наука», 1986. – С. 56-63.
- 47 Гринфельд М.А. Методы механики сплошных сред в теории фазовых превращений. – М. : «Наука», 1990. – 312 с.
- 48 Деменков А.П. , Лихачев В.А., Французов Н.С. Сверхпластичность (аномальная пластичность в металлах и сплавах). Часть первая . – Л. : Препринт Физ.-техн. ин-та АН СССР № 343, 1972. – 68 с.
- 49 Деменков А.П. , Лихачев В.А., Французов Н.С. Природа сверхпластичности . Л. : Препринт Физ.-техн. ин-та АН СССР № 344, 1972. – 56 с.

- 39 Марочник сталей и сплавов/ Под ред. Зубченко А.С. – 2е изд. – М.: «Машиностроение», 2003.- 782 с.
- 40 Любов Б.Я. Кинетическая теория фазовых превращений. – М. : «Металлургия», 1969 . – 264 с.
- 41 Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. – М. : «Металлургия», 1974. – 400 с.
- 42 Физическое металловедение / Под ред. Р. Кана. Вып. 2. Фазовые превращения. Metallographia : Пер. с англ. – М. : «Мир», 1968. – 492 с.
- 43 Физическое металловедение. В трех томах. Изд. третье, перераб. и доп. / Под ред. Р.У. Канна и П. Хаазена. Том 2. Фазовые превращения в металлах и сплавах и сплавы с особыми физическими свойствами : Пер. с англ. – М. : «Металлургия», 1987. – 624 с.
- 44 Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. Том 2 : Пер. с англ . – М. : « Мир», 1969 . – 864 с.
- 45 Пэжина П., Савчук А. Проблемы термопластичности : Сб. ст. // Проблемы теории пластичности и ползучести : Пер. с англ. - М. : « Мир», 1979. – С. 94 – 202 .
- 46 Кондауров В.И., Никитин Л.В. Термомеханика фазовых переходов в упруго-вязкопластической среде при конечных деформациях : Сб. ст. // Математические методы механики деформируемого твердого тела . – М. : «Наука», 1986. – С. 56-63.
- 47 Гринфельд М.А. Методы механики сплошных сред в теории фазовых превращений. – М. : «Наука», 1990. – 312 с.
- 48 Деменков А.П. , Лихачев В.А., Французов Н.С. Сверхпластичность (аномальная пластичность в металлах и сплавах). Часть первая . – Л. : Препринт Физ.-техн. ин-та АН СССР № 343, 1972. – 68 с.
- 49 Деменков А.П. , Лихачев В.А., Французов Н.С. Природа сверхпластичности . Л. : Препринт Физ.-техн. ин-та АН СССР № 344, 1972. – 56 с.

- 50 Бочвар А.А., Свидерская З.А. Явление сверхпластичности в сплавах цинка с алюминием // Изв. АН СССР, ОТН. – 1945. № 9. – с. 821 – 824.
- 51 Пуарье Ж.П. Высокотемпературная пластичность кристаллических тел : Пер. с франц. – М. : «Металлургия», 1982. – 272 с.
- 52 Пуарье Ж.-П. Ползучесть кристаллов. Механизмы деформации металлов, керамики и минералов при высоких температурах : Пер. с англ. – М. : «Мир», 1988. – 288 с.
- 53 Greenwood G.W., Johnson R.H. The deformation of metals under small stresses during phase transformations // Proceeding of the Royal Society. – 1965. – S.A. – 283. - № 1394. – P. 403-422.
- 54 Kot R.A., Weiss V. Transformation plasticity in Iron-Nicel Alloys // Metallurgical Transactions. – 1970. – 1. - № 10. – P. 2685-2693.
- 55 Черепин В.Т. Экспериментальная техника в физическом металловедении. – Киев: «Техніка», 1968. – 280 с.
- 56 Головин С.А., Пушкар А., Левин Д.М. Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов. – М.: «Металлургия», 1987. – 190 с.
- 57 Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. – М. : ГИФМЛ, 1960. – 670 с.
- 58 Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред.: Пер. с англ. – М. : «Мир», 1976. – 464 с.
- 59 Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике: Пер. с англ. – М.: «Мир», 1975. – 543 с.
- 60 Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. – Изд. 3-е, перераб. и дополн. – М.: «Металлургия», 1984. – 360 с.
- 61 Бойл Дж., Спенс Дж. Анализ напряжений в конструкциях при ползучести: Пер. с англ. – М.: «Мир», 1986. – 360 с.
- 62 Кеннеди А.Дж. Ползучесть и усталость в металлах: Пер. с англ. – М.: «Металлургия», 1965. – 312 с.

- 63 Гарофало Ф. Законы ползучести и длительной прочности металлов и сплавов: Пер. с англ. – М.: «Металлургия», 1968. – 304 с.
- 64 Тайра С., Отани Р. Теория высокотемпературной прочности материалов: Пер. с японск. – М.: «Металлургия», 1986. – 280 с.
- 65 Чадек Й. Ползучесть металлических материалов : Пер. с чешск. – М. : «Мир», 1987. – 304 с.
- 66 Фрост Г.Дж., Эшби М.Ф. Карты механизмов деформации : Пер. с англ. – Челябинск : «Металлургия», 1989. – 328 с.
- 67 Богуславский М.Г., Широков К.П. СИ Международная система единиц SI. Изд. второе, исправл. и доп. – М.: Изд-во Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, 1968. – 64 с.
- 68 Лурье К.А. Оптимальное управление в задачах математической физики. –М.: «Наука», 1975.- 479 с.
- 69 Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. – М.: «Наука», 1975.- 568 с.
- 70 Производство катанки и арматурного проката на стане 150. Технологическая инструкция ТИ 840-ПЗ – 2002 (Взамен ВТИ 840- П- 13- 2000).- Жлобин: БМЗ, 2002.- 50 с.
- 71 Производство заготовок и сортового проката на стане 850. Технологическая инструкция ТИ 840-П2-01-2000 (Взамен ТИ 840-П2-01-96).- Жлобин: БМЗ, 2000.- 67 с.
- 72 Производство заготовок и сортового проката на стане 850. Технологическая инструкция ТИ 840-П2-01-2000. Изменение 2.- Жлобин: БМЗ, 2001.- С.2,14.
- 73 Производство заготовок и сортового проката на стане 850. Технологическая инструкция ТИ 840-П2-01-2000. Изменение 3, 4, 5. -Жлобин: БМЗ, 2002.- С.58, 59, 18.
- 74 Производство заготовок и сортового проката на стане 850. Технологическая инструкция ТИ 840-П2-01-2000. Изменение 6. -Жлобин: БМЗ, 2003.- С. 4, 20.