

М484441

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ПОКРОВСКИЙ АЛЕКСЕЙ МИХАЙЛОВИЧ

УДК 539.374

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В КРУПНОГАБАРИТНЫХ БАНДАЖАХ
ОПОРНЫХ ВАЛКОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ

01.02.06 - динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1989

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор ВАФИН Р.К.

Научный консультант - кандидат технических наук,
доцент ЛЕШКОВЦЕВ В.Г.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор СТАСЕНКО И.В.

кандидат технических наук,
с.н.с. НИКОЛАЕВ В.А.

Ведущее предприятие - указано в решении Совета.

Защита диссертации состоится "12" ИЮНЯ 1989 г.
на заседании специализированного Совета К.053.15.11 "Маши-
ностроение" МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва,
2-я Ба

О
высыла
С
им. Н.

спец
канц

Объем
Л-184

И 484441

Баумана

Крупногабаритные опорные валки обычно делаются составными (бандажированными). Наиболее ответственной технологической операцией при создании таких валков является окончательная термическая обработка (закалка с отпуском или нормализация) бандажей. Проблема заключается в том, чтобы подобрать такие режимы термообработки, которые бы способствовали формированию в бандаже заданного структурного состава, обеспечивающего требуемую твердость на рабочей поверхности, но не приводили бы к разрушению. Случаи самопроизвольного разрушения крупногабаритных бандажей при их хранении после термообработки или при последующей механической обработке зарегистрированы, в частности, на ПО НПОЗ. Причиной самопроизвольного разрушения крупногабаритных бандажей является по-видимому водородная хрупкость, которая развивается в присутствии растягивающих напряжений. Источниками напряжений при термической обработке являются объемные деформации, связанные с неравномерностью температурного поля и со структурными превращениями.

Экспериментальные работы по определению остаточных напряжений в бандажах являются чрезвычайно дорогостоящими, так как каждый бандаж представляет собой уникальную деталь. К тому же экспериментальные методы не позволяют исследовать кинетику формирования остаточных напряжений.

В связи с этим возникает задача математического моделирования термомеханических процессов, протекающих при термической обработке крупногабаритных бандажей. Решение такой задачи поз-



1484771

Покровский А. М. Разработка

М В Т У
им. Н. С. Баумана
БИБЛИОТЕКА

воляет проследить кинетику формирования остаточных напряжений и добиться, варьируя условия внешнего теплообмена, рационального, с точки зрения уменьшения растягивающих напряжений, распределения остаточных напряжений.

Цель исследования – создание математической модели термомеханических процессов, протекающих в стали при нагреве и охлаждении. Данная проблема связана с проведением комплексного исследования физико-механических свойств стали при термообработке и с разработкой численных методов расчета температурного, структурного и напряженного состояний. В качестве объекта экспериментального исследования выбрана сталь с высокой прокаливаемостью 75X2ГНМФ. Данная марка стали признана перспективной для изготовления бандажей опорных валков проектируемого прокатного стана "5000".

Научная новизна. Проведено экспериментальное исследование распада переохлажденного аустенита в стали 75X2ГНМФ под действием растягивающих напряжений. Осуществлено теоретическое описание экспериментальных данных, позволяющее моделировать объемные изменения и структурные превращения в стали при термообработке.

Проведено экспериментальное исследование пластичности и ползучести стали 75X2ГНМФ в различных структурных состояниях, а также сверхпластичности бейнитного превращения. Получены уравнения состояния, позволяющие прогнозировать деформирование стали при термообработке крупногабаритных бандажей.

Разработана методика численного решения двумерной задачи теплопроводности с учетом зависимости теплофизических коэффициентов от температуры и фазового состава, а также тепловыделений при структурных превращениях, основанная на неявной конечно-разностной схеме.

Создана математическая модель распада переохлажденного аустенита при термообработке стали, позволяющая учесть влияние напряженного состояния на ход превращений.

Разработана методика расчета напряженного состояния термически обрабатываемого крупногабаритного бандаж, основанная на решении осесимметричной задачи термоупруговязкопластичности с учетом изменения структурного состава и эффекта сверхпластичности.

Достоверность результатов исследования вытекает из обоснованности использованных теоретических положений и математических методов и подтверждена численными экспериментами по оценке сходимости и точности разработанных алгоритмов, а также - решением тестовых задач и сопоставлением расчетных значений напряжений с результатами натурного эксперимента.

Практическая ценность работы состоит в том, что на основе разработанных алгоритмов составлены ЭВМ-программы для численного исследования влияния режимов термообработки на распределение остаточных напряжений и структурного состава в крупногабаритных бандажах. Проведение такого исследования позволяет выбрать наиболее рациональные режимы термообработки крупногабаритных бандажей. Результаты работы в виде расчетных методик, а также конкретных рекомендаций по совершенствованию термообработки бандажей опорных валков станков "5000" и ТЛС-3000 переданы для практического использования в ПО НКМЗ и НПО ВНИИМЕТМАШ.

Апробация работы. В ходе выполнения диссертационной работы результаты исследования докладывались и обсуждались на III Уральской региональной конференции "Функционально-дифференциальные уравнения и их приложения" (Пермь, 1988), Сибирской школе по современным проблемам механики деформируемого твердого тела (Новосибирск, 1988), а также на научном семинаре "Прикладная теория пластичности и ползучести" в МВТУ им. Н.Э.Баумана в 1987, 1988 и 1989 годах.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, раздела с основными результатами и выводами, списка литературы из 138 наименований, приложения и содержит 131 страницу машинописного текста, 68 рисунков и 2 таблицы. В приложении приведены документы, подтверждающие практическое использование результатов работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечена актуальность темы, содержатся краткие сведения о технологическом процессе изготовления составных опорных валков прокатных станов, сформулирована цель работы, научная новизна, практическая ценность и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ работ, посвященных изучению термомеханических процессов, протекающих в крупногабаритных стальных деталях при термообработке, позволивший выявить состояние вопроса и сформулировать задачи исследования.

Математическому моделированию термомеханических процессов при термообработке, связанному с определением температурного, структурного и напряженного состояний в деталях посвящены работы В.В.Абрамова, В.А.Домакина, Н.П.Морозова, А.М.Легуна, И.А.Борисова, Н.И.Загряцкого, С.Я.Устиловского, В.С.Марганца, В.А.Винокурова, В.Е.Лошкарева, Н.А.Адамовой, Т. Inoue, K. Tanaka, Z.-G. Wang, H.-J. Yn, S. Denis и др. Выполненный анализ литературных источников позволил заключить, что несмотря на значительные успехи советских и зарубежных ученых в этом направлении данная проблема, в силу своей сложности, еще не является в настоящее время до конца исследованной. Решение задачи в значительной степени осложняется протеканием структурных превращений, оказывающих большое влияние на механические свойства и теплофизические характеристики, а также приводящих к тепловыделениям и проявлению сверхпластичности в процессе фазовых переходов. В связи с этим задачи определения температурного, структурного и напряженного состояний оказываются взаимосвязанными.

Реальные процессы термообработки крупногабаритных деталей протекают таким образом, что в различных температурных интервалах в процессе остывания детали могут формироваться пластические деформации и проявляться реономные свойства стали. Условия нагружения при термообработке существенно отличаются от простого. В связи с этим решение необходимо проводить, применяя теории, описывающие историю нагружения, с использованием модели упруго-вязко-пластической среды, изменяющей струк-

турный состав, и описывающей сверхпластичность превращений.

В настоящее время отсутствуют работы, в которых решение проведено в указанной постановке. Использование в работах многих авторов модели упруго-пластического тела объясняется в первую очередь отсутствием экспериментальных данных по ползучести инструментальных сталей в широком температурном диапазоне (20...900°C), характерном для термообработки, в различных структурных состояниях, а также несовершенством существующих математических методов решения задачи термползучести с учетом неустойчивости фазового состава.

Большинством зарубежных исследователей решение проведено в двумерной постановке с использованием метода конечных элементов (МКЭ). В отечественных работах, как правило, рассматривается неограниченный цилиндр.

В работе моделирование термомеханических процессов, протекающих в термически обрабатываемых крупногабаритных бандажах, проведено в двумерной постановке с учетом всех отмеченных особенностей поведения стали при термообработке.

Во второй главе отображены результаты экспериментального исследования и теоретического описания физико-механических свойств стали 75Х2ГНМФ.

Для изучения объемных деформаций в стали при термообработке проведено dilatометрическое исследование. Испытания выполнены на dilatометре фирмы "LINSEIS", оснащенном электронными блоками записи удлинений и температур.

Свободная деформация гетерогенной структуры вычислялась на основании принципа аддитивности по уравнениям dilatограмм отдельных фаз

$$\varepsilon = \varepsilon_A \cdot V_A + \varepsilon_P \cdot V_P + \varepsilon_B \cdot V_B + \varepsilon_M \cdot V_M \quad (1)$$

где $\varepsilon_A, \varepsilon_P, \varepsilon_B, \varepsilon_M, V_A, V_P, V_B, V_M$ - свободные деформации и объемные доли аустенита, перлита, бейнита и мартенсита соответственно.

Суммарный коэффициент линейного расширения, учитывающий температурные и фазовые изменения объема за интервал температуры Δt , определялся по уравнению

$$\alpha = \Delta \varepsilon / \Delta t \quad (2)$$

Результатами dilatометрического исследования кроме этого явились термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита, а также кинетические кривые распада аустенита в мартенсит при охлаждении и отпуска мартенсита при отогреве, для которых были подобраны аппроксимирующие зависимости.

Исследование влияния напряжений на структурные превращения и свойств пластичности и ползучести стали осуществлялось на экспериментальной установке типа ИМАШ - 20-75 в условиях одноосного растяжения. На установке имелась возможность исследовать изменение удельного электросопротивления образца в процессе испытания. На рис. I в качестве примера приведена кривая падения удельного электросопротивления для распада аустенита в перлит при температуре 600°C.

На основании принципа аддитивности кривые падения удельного электросопротивления пересчитывались в кинетические кривые распада аустенита по формуле

$$V_{\alpha} = (\rho_{\alpha} - \rho) / (\rho_A - \rho_{\alpha}) \quad (3)$$

где ρ , ρ_A и ρ_{α} - удельные электросопротивления гетерогенной структуры, аустенита и продукта распада (перлита, бейнита) соответственно; V_{α} - объемная доля продукта распада.

Для температуры аустенизации 860...870°C получена изотермическая диаграмма (ИТД) распада переохлажденного аустенита. При изучении структурных превращений под нагрузкой установлено, что растягивающие напряжения оказывают заметное воздействие только на бейнитное превращение. При этом увеличение приложенного напряжения приводит к ускорению хода превращения и снижению предельной степени распада аустенита. На рис. 2 приведены кинетические кривые распада аустенита в бейнит под нагрузкой при температуре 300°C. Для описания этого эффекта предложено использовать параметры Ω и B , учитывающие соответственно снижение времени полураспада и предельной степени распада под напряжением.

Изучение ползучести стали проведено для каждой отдельной структуры. Испытания аустенита осуществлены при темпе-

ратурах его стабильного состояния (750, 450, 200°C) при напряжениях 60...800 МПа. Перлит, полученный при 650°C, испытан при температурах 600, 400, 200°C и напряжениях 150...850 МПа. Опыты на ползучесть низкотемпературных фаз бейнита и мартенсита показали, что ползучестью этих фаз при термообработке крупногабаритных бандажей можно пренебречь.

Результаты опытов на ползучесть проанализированы с точки зрения возможной формулировки уравнений состояния. Предположено, что кривая ползучести гетерогенной структуры определяется по кривым ползучести аустенита и перлита пропорционально их объемным долям

$$\varepsilon_c(\tau) = \varepsilon_c^A(\tau) \cdot V_A + \varepsilon_c^P(\tau) \cdot V_P \quad (4)$$

При использовании для описания кривых ползучести аустенита ε_c^A и перлита ε_c^P соотношений теории упрочнения (результаты теоретического описания ползучести аустенита по этой теории при 750°C представлены на рис.3 штриховыми линиями), выражение для скорости деформации ползучести в случае постоянного на шаге фазового состава имеет вид

$$\dot{\varepsilon}_c = \frac{\gamma_A \cdot \sigma^{\nu_A}}{(\varepsilon_c^A) \beta_A} \cdot V_A + \frac{\gamma_P \cdot \sigma^{\nu_P}}{(\varepsilon_c^P) \beta_P} \cdot V_P \quad (5)$$

где γ_A , ν_A , β_A , γ_P , ν_P , β_P - коэффициенты, зависящие от температуры.

В отличие от классической теории упрочнения в уравнение (5) явно не входит накопленная деформация ползучести ε_c , а входят деформации ε_c^A и ε_c^P , подсчитанные по кривым ползучести аустенита и перлита для времени, которому соответствует на кривой ползучести гетерогенной структуры накопленная деформация ползучести ε_c . Определение ε_c^A и ε_c^P сводится к решению итерационным способом трансцендентного уравнения (4).

При исследовании сверхпластичности структурных превращений установлено, что в процессе бейнитного превращения при наличии напряжений проявляется особый тип неупругой деформации, связанный с упорядочением сдвигов при перестройке кристаллической решетки под нагрузкой. Выяснено, что величина

этой деформации определяется только уровнем приложенного напряжения и объемной долей образовавшегося бейнита

$$\Delta \varepsilon_b = \zeta_b \cdot b \cdot \Delta V_b, \quad (6)$$

где ζ_b - константа.

Эффекта сверхпластичности при перлитном и мартенситном превращениях при испытании данной стали не обнаружено.

В связи с тем, что сверхпластическая деформация развивается во времени, она объединялась с деформацией ползучести. Уравнения состояния в этом случае имеют вид

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^c = \frac{3}{2} \cdot \frac{S_{ij}}{b_i} \left(\frac{\dot{\gamma}_A \cdot b_i^{V_A}}{(q_c^A)^{\beta_A}} \cdot V_A + \frac{\dot{\gamma}_n \cdot b_i^{V_n}}{(q_c^n)^{\beta_n}} \cdot V_n + \zeta_b \cdot b_i \cdot \dot{V}_b \right), \quad (7)$$

где S_{ij} - девиатор напряжений, $q_c^{A(n)} = \int d\bar{\varepsilon}_i^{A(n)}$ - параметр Удквиста при ползучести для аустенита (перлита), (.) - обозначает дифференцирование по времени.

Исследование пластичности стали проведено при скорости деформирования $\dot{\varepsilon} = 10^{-2}$ 1/с. Как и в опытах на ползучесть сталь испытана в различных структурных состояниях. Аустенит исследован при температурах 750, 450, 200°C, перлит - 600, 400, 200, 20°C, бейнит - 330, 250, 20°C, мартенсит - 200, 100, 20°C. Показано, что с точностью до разброса экспериментальных данных кривые растяжения, полученные при указанной скорости деформирования, можно считать мгновенными. Аппроксимация кривых проведена по схеме упруго-пластического тела со степенным упрочнением. Результаты аппроксимации для аустенита представлены на рис.4 штриховыми линиями. Для описания пластичности гетерогенной структуры использован принцип аддитивности. Предложены следующие уравнения состояния при пластичности

$$b_i = E \cdot \varepsilon \quad \varepsilon \leq \varepsilon_T = (b_{TA} \cdot V_A + b_{Tn} \cdot V_n + b_{TB} \cdot V_b + b_{Tm} \cdot V_m) / E, \quad (8)$$

$$b_i = b_{TA} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{TA}} \right)^{m_A} \cdot V_A + b_{Tn} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{Tn}} \right)^{m_n} \cdot V_n + b_{TB} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{TB}} \right)^{m_b} \cdot V_b + b_{Tm} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{Tm}} \right)^{m_m} \cdot V_m,$$

где E - модуль упругости; $\varepsilon = q_p + b_i / E$ - силовая деформация; $q_p = \int d\bar{\varepsilon}_i^p$ - параметр Удквиста при пластичности; b_{TA} , b_{Tn} , b_{TB} , b_{Tm} , m_A , m_n , m_b , m_m - пределы текучести и показатели упрочнения, зависящие от температуры, для аустенита, перлита, бейнита и мартенсита соответственно.

В третьей главе приведены постановка и методика численного решения связанной задачи теплопроводности и определения структурного состава.

Задача теплопроводности решена в осесимметричной постановке. Интегрирование дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности проведено для полого цилиндра конечной длины. Используются граничные условия третьего рода с коэффициентом теплоотдачи, зависящим от температуры поверхности, и учитывающим теплообмен конвекцией и излучением. Принята зависимость коэффициента теплоемкости от температуры, а плотности и коэффициента теплопроводности еще и от структурного состава. Учет скрытой теплоты фазовых превращений осуществлен за счет введения в уравнение теплопроводности мощности удельных источников энерговыделения.

Методика численного решения задачи основана на применении метода конечных разностей. Уравнения для регулярных узлов прямоугольной неравномерной сетки записаны по чисто неявной безусловно устойчивой схеме. Приняты переменные шаги по времени. Выражения для нерегулярных узлов получены на основании метода исключения фиктивных узлов. Для решения использован метод суммарной аппроксимации, при котором система уравнений с пятидиагональной матрицей заменяется двумя системами с трехдиагональными матрицами, каждая из которых решается методом прогонки.

Математическое моделирование распада аустенита в перлит и бейнит проведено по теории изокINETических реакций. При этом для описания изотермического распада аустенита в перлит использовано уравнение Аврами, а для бейнитного превращения — более сложное уравнение, учитывающее ускорение хода превращения под нагрузкой и снижение предельной степени распада

$$V_b(\tau) = \left\{ 1 - \exp[-K_b(t) \cdot (\Omega(\beta_c) \cdot \tau)^{P_b(t)}] \right\} \cdot A(t) \cdot B(\beta_c) \cdot V_A^b \quad (9)$$

где K_b и P_b — коэффициенты, определяемые по ИТД, V_A^b —

объемная доля аустенита к моменту входа в бейнитную область, A — предельная степень распада аустенита в бейнит для данной температуры.

Согласно теории изокINETических реакций переход от изотермической кинетики распада аустенита к неизотермическим условиям осуществлен исходя из правила аддитивности. Уравнения для определения объемной доли бейнита на n -ом шаге имеют вид

$$\tau_n^b = \frac{1}{\Omega(\delta_i^{n-1})} \left[- \frac{\ln(1 - V_b^{n-1}/V_A^b \cdot A(t_n) \cdot B(\delta_i^{n-1}))}{K_b(t_n)} \right] \frac{1}{n_b(t_n)} \quad (10)$$

$$V_b^n = \left\{ 1 - \exp \left[-K_b(t_n) \cdot [\Omega(\delta_i^{n-1}) \cdot (\tau_n^b + \Delta\tau_n)]^{n_b(t_n)} \right] \right\} \times A(t_n) \cdot B(\delta_i^{n-1}) \cdot V_A^b.$$

Выражения для расчета объемной доли перлита получаются из уравнений (10), если положить значения V_A^b , A , B и Ω равными единице.

Для описания атермического мартенситного превращения использованы зависимости объемной доли от температуры, полученные в ходе дилатометрического исследования.

Четвертая глава посвящена определению напряженного состояния крупногабаритных бандажей при термообработке. Расчет проведен в геометрически линейной постановке, но с учетом физической нелинейности, посредством решения задачи термоупруго-вязкопластичности. В работе использован общий подход к решению поставленной задачи, при котором считается, что материал обладает вязкими свойствами как в упругой, так и в пластической областях. Принято допущение, что тензор полной деформации можно представить в виде суммы

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^c + \delta_{ij} \cdot \varepsilon_T, \quad (11)$$

где ε_{ij}^e , ε_{ij}^p , ε_{ij}^c — компоненты упругой, пластической и деформации ползучести соответственно; $\varepsilon_T = \alpha \cdot \Delta t$ — свободная деформация, учитывающая температурные и структурные изменения объема; δ_{ij} — символ Кронекера.

Для решения физически нелинейной задачи применен шаговый метод дополнительных (начальных) деформаций. Описание пластического и вязкого деформирования стали осуществлено по теориям пластического течения и ползучести упрочнения, распространенным на случай переменного фазового состава. Расчет в соответ-

ствии с указанными теориями проведен в приращениях. Решение задачи термоупруговязкопластичности сведено согласно методу дополнительных деформаций к последовательному решению задачи термоупругости. При этом приращения деформаций пластичности и ползучести, входящие в состав приращения дополнительной деформации, итерационно уточняются на каждом шаге.

В соответствии с работами Ю.Н.Работнова предположено, что в первый момент шага происходит мгновенное приращение упруго-пластической деформации, вычисляемой по мгновенным кривым растяжения, и температурно-структурной деформации, так как принято, что температура в первый момент шага скачкообразно изменяется на Δt и остается постоянной в течение всего шага по времени. В дальнейшем приращение полной деформации на данном шаге происходит только за счет ползучести.

Аналогично тому, как это сделано в работах T. Inoue принято существование пластического потенциала, зависящего не только от параметра Удквиста и температуры, но также и от структурного состава

$$F_p = (3/2 \cdot S_{ij} \cdot S_{ij})^{1/2} - f_T(q_p, t, \{V\}), \quad (12)$$

где $\{V\}$ – вектор объемных долей фаз, f_T – функция, вид которой конкретизирован в испытаниях на одноосное растяжение (8).

Вычисление интенсивностей приращений пластических деформаций произведено по мгновенным кривым растяжения по формулам, аналогичным полученным в работах И.А.Биргера для расчета по неизотермической теории течения. Используются уравнения Прандтля–Рейсса.

Определение приращений деформаций ползучести произведено по скоростям деформаций ползучести, вычисленным по уравнению (7), с применением схемы Эйлера с итерациями.

Решение осесимметричной задачи термоупругости проведено методом конечных элементов, основанном на вариационном уравнении Лагранжа. Используются треугольные осесимметричные конечные элементы с линейной аппроксимацией перемещений. Осуществлена автоматизация задания координат конечно-элементной сетки, а также матриц индексов. Для решения системы линейных

алгебраических уравнений МКЭ применен алгоритм метода Гаусса с раздельными операциями факторизации и обратного хода. Применение указанного алгоритма особенно актуально при решении задачи термоупруговязкопластичности методом дополнительных деформаций, так как в этом случае имеется возможность на каждом временном шаге один раз произвести операцию факторизации, а на итерациях осуществлять только процедуру обратного хода.

Контроль за сходимость итерационного процесса осуществлен посредством сравнения Евклидовой нормы вектора узловых сил системы, в компоненты которого входят приращения дополнительных деформаций, с ее значением на предыдущей итерации. Надо отметить, что в алгоритме решения задачи термоупруговязкопластичности использована неявная схема, поэтому результаты расчета сохраняют физический смысл при любых шагах по времени, а следовательно, и по нагрузке. Выбор шага влияет только на точность расчета.

В пятой главе приведены и проанализированы результаты численной реализации разработанных расчетных методик применительно к реальным бандажам опорных валков прокатных станов. Проведено сравнение расчетных значений с экспериментальными данными В.Т.Фирсова, полученными при испытании опытного образца бандажа опорного валка стана "5000", изготовленного на ПО НКМЗ из стали 75ХСГНМФ. Размеры бандажа (м): наружный диаметр - 2,10; внутренний - 0,76; длина - 5,00. Режим термообработки - нормализация. Сравнительный анализ показал, что окружные остаточные напряжения, являющиеся наиболее характерными при термообработке бандажей, прогнозируемые с помощью предлагаемой математической модели, удовлетворительно согласуются с результатами натурального эксперимента.

Для обоснования целесообразности решения задачи в предлагаемой постановке осуществлено численное исследование воздействия различных факторов расчетной схемы на конечный результат. Анализ проведен на примере расчета бандажа опорного валка прокатного стана "5000" при ускоренной нормализации. Изолинии остаточных окружных напряжений в бандаже для упрощенного варианта расчета приведены на рис.5 (цифры указывают σ_t в МПа). Видно, что вблизи торцов формируются области с повышен-

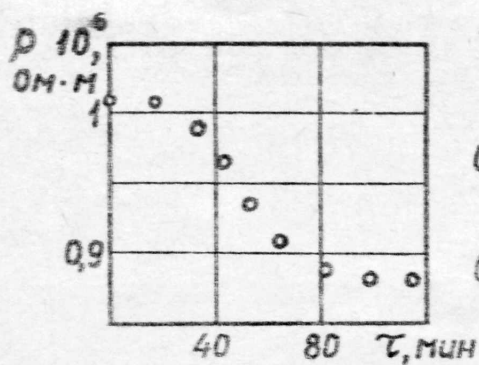


Рис. 1

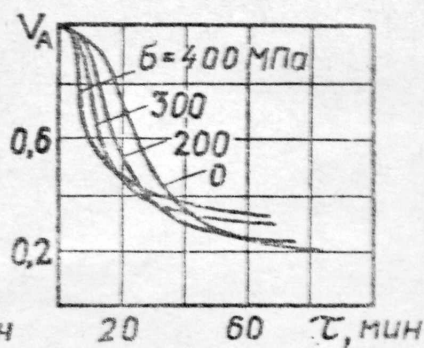


Рис. 2

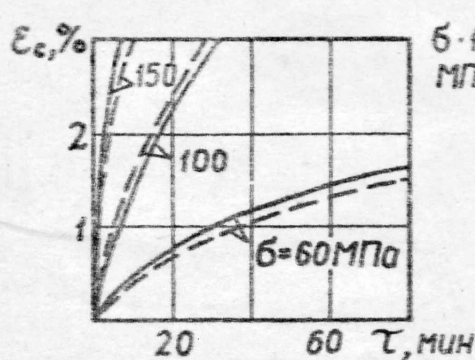


Рис. 3

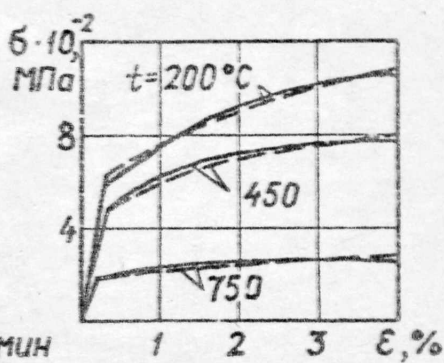


Рис. 4

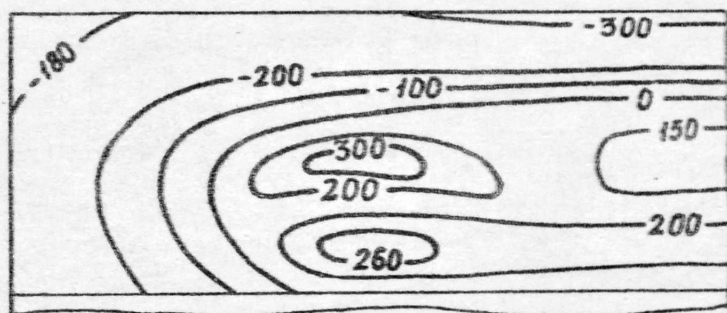


Рис. 5

ним уровнем остаточных окружных растягивающих напряжений, превышающих значения напряжений в центральной части банджа, что приводит к заключению о необходимости решения задачи в двумерной постановке. Показано, что в случае использования задачи термоупругопластичности максимальные напряжения возрастают на 40%. Установлено, что пренебрежение сверхпластичностью бейнитного превращения приводит к завышению результатов расчета приблизительно на 25%. Выявлено, что учет влияния напряженного состояния на структурные превращения приводит к повышению уровня остаточных напряжений, причем это повышение растет с интенсификацией режимов охлаждения.

С целью выработки рекомендаций по совершенствованию режимов термообработки бандажей опорных валков прокатных станов "5000" и ТЛС-3000 проведен сравнительный анализ результатов расчета, полученных при варьировании условиями внешнего теплообмена. Надо отметить, что бандаж опорного валка реально существующего стана ТЛС-3000 в отличие от первого изготавливается из стали 9ХФ и имеет меньшую длину, равную 2,98 м. При расчете указанного банджа использованы уравнения состояния, полученные для стали 75Х2ГНМФ, а ИТД принята по работам Н.П.Морозова.

В процессе численного анализа определен оптимальный режим охлаждения при ускоренной нормализации банджа опорного валка стана "5000". Рекомендовано отрезать от термообработанного банджа торцевые части длиной 500 мм. Обоснована целесообразность использования стали 75Х2ГНМФ для изготовления бандажей опорных валков прокатного стана "5000". Выработаны рекомендации по улучшению заводской технологии термообработки бандажей опорных валков стана ТЛС-3000 на ПО НКМЗ. Выяснено, что при термообработке банджа по имеющейся технологии целесообразно или отрезать торцевые части длиной 300 мм, или теплоизолировать его торцы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

I. Проведено экспериментальное исследование распада переохлажденного аустенита в стали 75Х2ГНМФ при непрерывном охлаждении и в изотермических условиях. Причем в последнем случае как в ненагруженном состоянии, так и под действием растягивающих напряжений.

1.1. Получены термокинетическая и изотермическая диаграммы распада переохлажденного аустенита.

1.2. Описаны объемные изменения в стали при ее охлаждении с различными скоростями, а также при отогреве мартенсита.

1.3. Установлено, что напряжения растяжения не влияют на кинетику образования перлита и мартенсита в этой стали и ускоряют бейнитное превращение, одновременно уменьшая степень его распада. Получены количественные соотношения, позволяющие учитывать это явление при расчете.

2. Проведено экспериментальное исследование пластичности и ползучести стали 75Х2ГНМФ в различных структурных состояниях, позволяющее выяснить особенности деформирования стали при температурах и скоростях деформаций, характерных для процесса термообработки крупногабаритных бандажей.

2.1. Получены уравнения мгновенных кривых растяжения аустенита, перлита, бейнита и мартенсита. Для описания кривых использована схема со степенным упрочнением.

2.2. Выяснено, что заметной ползучестью обладают только высокотемпературные фазы: аустенит и перлит. Описание полученных кривых ползучести проведено по теории упрочнения.

2.3. Установлено, что при протекании бейнитного превращения под напряжением развиваются необратимые деформации. Кинетика развития этих деформаций подобна кинетике бейнитного превращения. Найдены количественные соотношения, позволяющие учитывать сверхпластичность бейнитного превращения при расчете напряжений.

3. Разработана методика расчета температурного состояния термообрабатываемого бандажа, основанная на неявной схеме метода конечных разностей, с учетом зависимости теплофизических коэффициентов от температуры и фазового состава и тепловыделений при структурных превращениях.

4. Разработана математическая модель распада переохлажденного аустенита, позволяющая рассчитывать структурный состав и объемные деформации в процессе термообработки с учетом влияния напряженного состояния на кинетику бейнитного превращения.

5. Разработана методика расчета напряженного состояния несимметричных деталей при термообработке. Решение построено

на базе метода конечных элементов. Использована модель упруго-вязко-пластической среды, учитывающая изменение структурного состава и сверхпластичность бейнитного превращения.

6. Разработан и оптимизирован комплекс программ на алгоритмическом языке ФОРТРАН, позволяющий реализовать расчетные методики на ЭЕМ типа ЕС.

7. Проведены расчеты бандажей опорных валков прокатных станов "5000" и ТЛС-3000 при варьировании условиями внешнего теплообмена. Получены рекомендации по совершенствованию режимов термообработки.

8. Результаты работы переданы для практического использования в НПО БИНИММАТ и ЦО НКМЗ.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Бафин Р.М., Лешковцев В.Г., Покровский А.М. Численное интегрирование дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности с нелинейными коэффициентами и граничными условиями для цилиндрических тел // Функционально-дифференциальные уравнения и их приложения: Тез. докл. III Уральской региональной конференции. - Пермь, 1988. - С. 221.

2. Лешковцев В.Г., Покровский А.М., Бойков В.Н. Математическое моделирование процессов превращения пересохлажденного аустенита в эвтектоидных сталях // Металловедение и Термическая обработка металлов. - 1988. - № 1. - С. 17-19.

3. Лешковцев В.Г., Покровский А.М. Алгоритм решения задач термо-упруго-вязко-пластичности на основе МКЭ с учетом структурных превращений // Изв. вузов. Машиностроение. - 1988. - № 5. - С. 12-16.

4. Покровский А.М. Численное решение нелинейного уравнения нестационарной теплопроводности для цилиндра конечной длины методом конечных разностей // Изв. вузов. Машиностроение. - 1988. - № 6. - С. 84-88.

5. Лешковцев В.Г., Покровский А.М. Расчет напряжений в бандаже опорного вала прокатного стана "5000" при ускоренной нормализации // Изв. вузов. Черн. металлургия. - 1988. - № 9. - С. 82-85.

пер

